



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

4(252) 2016

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Philippe Ferrari, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Wolfgang Krautschneider, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Dr. Fa-Long Luo, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Emil Novakov, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Трифонов П.В., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Шкодырев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

4(252) 2016

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2016

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsykson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Peter V. Trifonov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The journal is indexed by Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, EBSCO, ProQuest, Index Copernicus, VINITI RAS Abstract Journal (Referativnyi Zhurnal), VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Russian Science Citation Index (RSCI) database © Scientific Electronic Library and Math-Net.ru databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Бевзенко И.Г. <i>Исследование поведения сверхкоротких импульсов в многопроводных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением.....</i>	7
--	---

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Андряков Ю.А., Аникина А.А., Беляев Я.В. <i>Выбор архитектуры и расчет параметров емкостного цифро-аналогового преобразователя для микромеханического акселерометра</i>	19
Бородулин Р.Ю. <i>Применение концептуальных моделей численных методов электродинамики для анализа характеристик вибраторов в бесконечных диссипативных средах.....</i>	29

Системный анализ и управление

Бурдаков С.Ф., Байдина Т.А., Шагниева О.Б. <i>Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределённого профиля</i>	43
--	----

Интеллектуальные системы и технологии

Янчус В.Э., Борович Е.В. <i>Исследование значения цветового решения в процессе гармонизации кинокадра.....</i>	53
Серикова Е.А., Сериков С.А. <i>Нейросетевая аппроксимация характеристик двигателя внутреннего сгорания</i>	70

Contents

Telecommunications Systems and Computer Networks

Bevzenko I.G. <i>Investigation of the Behavior of Ultrashort Pulses in Multiwire Structures with Inhomogeneous Dielectric Filling</i>	7
--	---

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Andryakov Yu.A., Anikina A.A., Belyaev Ya.V. <i>Architecture Selection and Parameter Calculation of a Capacitive Digital-to-Analog Converter for a Micromechanical Accelerometer</i>	19
Borodulin R.Yu. <i>Using Conceptual Models of Numerical Electrodynamical Methods for Analyzing the Characteristics of Vibrators in Infinite Dissipative Media</i>	29

System Analysis and Control

Burdakov S.F., Baydina T.A., Shagniev O.B. <i>Control of Vibrational State of a Robot Interacting with a Rough Free-formed Surface</i>	43
---	----

Intellectual Systems and Technologies

Yanchus V.E., Borevich E.V. <i>A Study of the Effect of Color Palette in the Process of Film Frame Harmonization</i>	53
Serikova E.A., Serikov S.A. <i>Neural Network Approximation of Internal-Combustion Engine Characteristics</i>	70

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ С НЕОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

I.G. Bevzenko

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF ULTRASHORT PULSES IN MULTIWIRE STRUCTURES WITH INHOMOGENEOUS DIELECTRIC FILLING

Представлены результаты исследований поведения сверхкоротких импульсов в многопроводных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением. Исследовано пять вариантов реализации структур, в которых могут появиться модальные явления. Данные явления могут быть причиной несрабатывания защитных приборов, либо наоборот, использоваться в качестве защиты от электромагнитных помех. Исследованы варианты создания модальных антиподов, которые можно получить за счет следующего: изменения расположения проводников на среднем слое многослойной печатной платы; изменения диэлектрической проницаемости окружающей среды; увеличения толщины диэлектрического слоя; заполнения диэлектриком внутренних полостей; изменения расположения проводников в кабеле.

МОДАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ; СВЕРХКОРОТКИЕ ИМПУЛЬСЫ; НЕОДНОРОДНОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ; ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И КАБЕЛИ; МНОГОПРОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ.

The paper presents the results of studying the behavior of ultrashort pulses in multiwire structures with inhomogeneous dielectric filling. Five different versions of the structures where the modal phenomena may appear have been investigated. These phenomena may be a reason why the safety devices malfunction, or, on the contrary, can be used as a protection against electromagnetic interference. Several variants of creating the modal antipodes have been studied. This may be achieved by the following: changing the location of the conductors in the middle layer of the multilayer printed circuit board; changing the permittivity of the environment; increasing the dielectric layer thickness; filling the internal cavities with the dielectric; changing the location of the conductors in the cable.

MODAL PHENOMENA; ULTRASHORT PULSES; INHOMOGENEOUS DIELECTRIC FILLING; PRINTED CIRCUIT BOARDS AND CABLES; MULTIPLE STRUCTURES

Развитие и широкое распространение электронных устройств различного назначения требует обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). Элементы вычислительной техники и систем управле-

ния связаны между собой межконтактными электрическими соединениями, или межсоединениями (interconnects). В настоящее время широко используются многопроводные межсоединения с неоднородным диэ-

лектрическим заполнением. Импульсные сигналы, распространяющиеся в них, можно разделить на два вида: полезные сигналы, используемые для передачи информации, и нежелательные сигналы, появившиеся в результате непреднамеренных и преднамеренных электромагнитных помех.

Часто помехи передаются по проводникам, что приводит к нарушению нормального функционирования систем телекоммуникаций. Особенно опасны сверхкороткие импульсы, способные вывести аппаратуру из строя. Это создает потребность в разработке специальных устройств защиты, основанных на новых технических принципах [1].

В печатных платах (ПП) могут возникать модальные искажения [2], которые применимы для защиты [3–5] от опасных сверхкоротких импульсов высокого напряжения [6]. Отсутствие срабатывания защитных устройств из-за возможности модального разложения и последующего восстановления импульса (РПВИ) в структурах с модальными антиподами [7] (отрезки трехпроводных связанных линий, у которых разницы задержек синфазной и дифференциальной мод противоположны по знаку) может усугубить эту проблему [8–11].

Цель данной статьи – представить результаты исследований поведения сверхкоротких импульсов в многопроводных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением.

**Исследование модальных явлений,
возникающих при расположении
проводников на среднем слое
в многослойной печатной плате (МПП)**

В работе [12] показан стек исследуемой МПП и ее параметры. В данном разделе приведены результаты моделирования структуры с проводниками на среднем слое (рис. 1 а) при разных значениях разнорасстояния s между проводниками, и ширинами проводников 1 и 2 (w_1 и w_2). Расстояние от края структуры до проводника $d = 2w_1$.

Компьютерное моделирование выполнялось в системе квазистатического анализа TALGAT [13], потери, дисперсия и высшие типы волн не учитывались. В работе

[9] представлено сравнение результатов вычислений в программах CST MWS (электродинамический анализ с потерями и без) и TALGAT (квазистатический анализ без потерь). Анализ и обработка полученных числовых и графических данных позволяют заключить, что результаты вычислительного эксперимента, полученные в CST MWS и TALGAT, для плоского кабеля с различным числом проводников и для одиночной линии и пары связанных линий согласуются между собой. Поэтому достаточно проводить квазистатический анализ в TALGAT и обойтись без электродинамического анализа CST MWS при исследовании погонных задержек мод в печатных платах и кабелях.

В самом общем случае распространение электрических сигналов в межсоединениях описывается уравнениями Максвелла. Поэтому строгое решение задачи вычислительного моделирования межсоединений требует численного решения уравнений Максвелла для граничных условий, определяемых конфигурацией межсоединений, при начальных значениях, задаваемых электрическими сигналами в межсоединениях. Однако необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, называемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, возникающих в межсоединениях), используется при анализе межсоединений, как правило, только на частотах в десятки и сотни гигагерц.

При статическом подходе делается упрощающее предположение, что в межсоединениях отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн, и может распространяться только основная, поперечная волна. Это сводит уравнения Максвелла к телеграфным уравнениям, решение которых значительно проще, но весьма точно для большинства практических межсоединений. При допущении распространения только поперечной волны получаются точные результаты даже при наличии небольших потерь в межсоединениях. Этот случай известен как квазистатический подход. При нём произвольная схема межсоедине-

ний представляется обобщенной схемной моделью, напряжения и токи в любой точке которой определяются из телеграфных уравнений для каждого отрезка многопроводной линии передач (МПЛП) с учётом граничных условий на концах отрезка, задаваемых окончаниями.

На рис. 2 представлены зависимости τ_e

и τ_o от s с шагом 0,1 мм, при $w_1 = w_2 = 0,5...2$ мм. Видно, что при изменении s на графиках τ_e и τ_o появляются максимумы и минимумы. Есть значение s , при котором $\Delta\tau = 0$. На рис. 1 б) представлена аналогичная зависимость, но для $\Delta\tau$. Видно, что есть области, где $\Delta\tau$ имеет разные знаки, и чем больше значение w , тем меньше значение

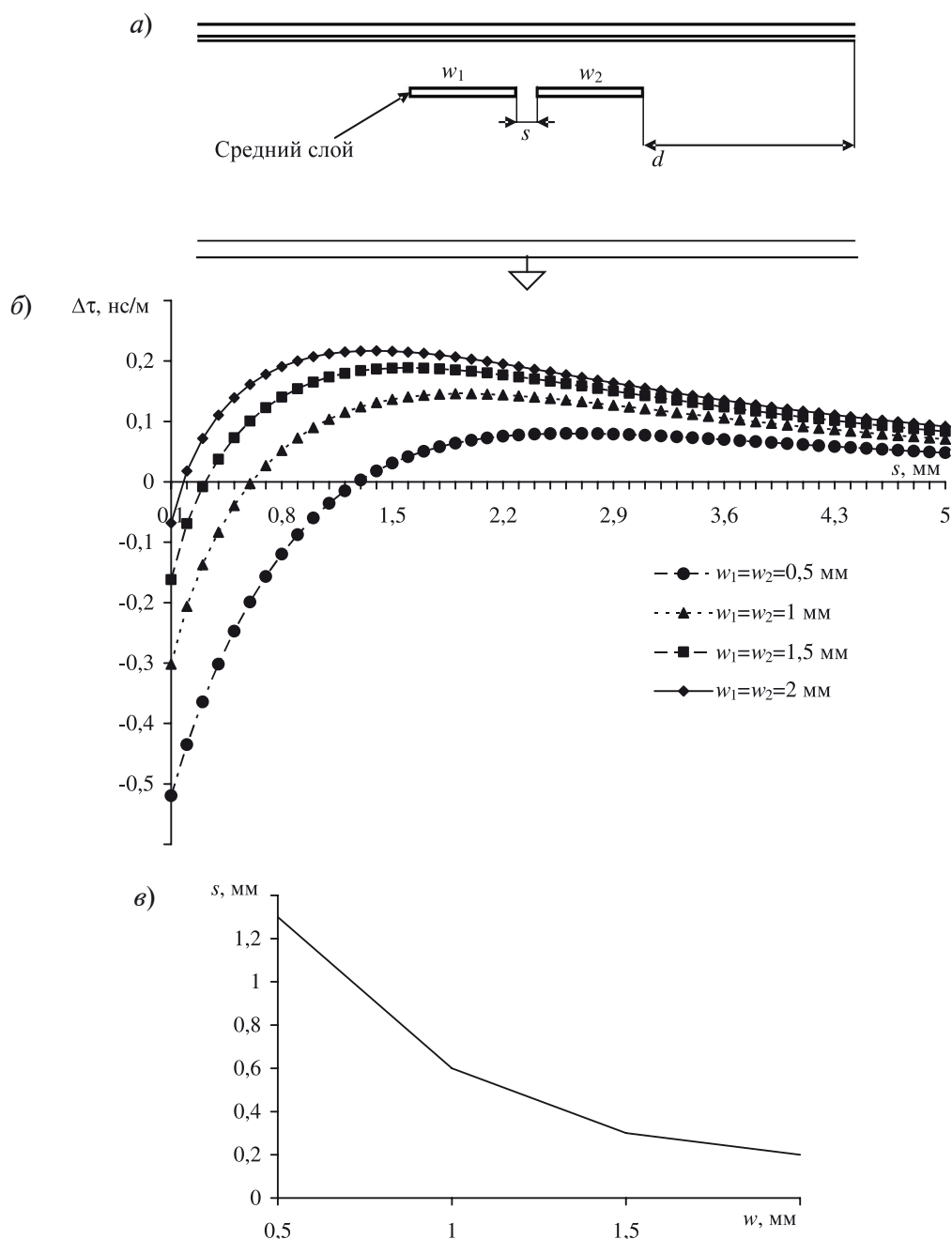


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой структуры при $s = 0,1$ мм, $w_1 = w_2 = 0,5$ мм (а); зависимость $\Delta\tau$ от s при $w_1 = w_2 = 0,5...2$ мм (б); зависимость s , при котором $\Delta\tau = 0$, от w (в)

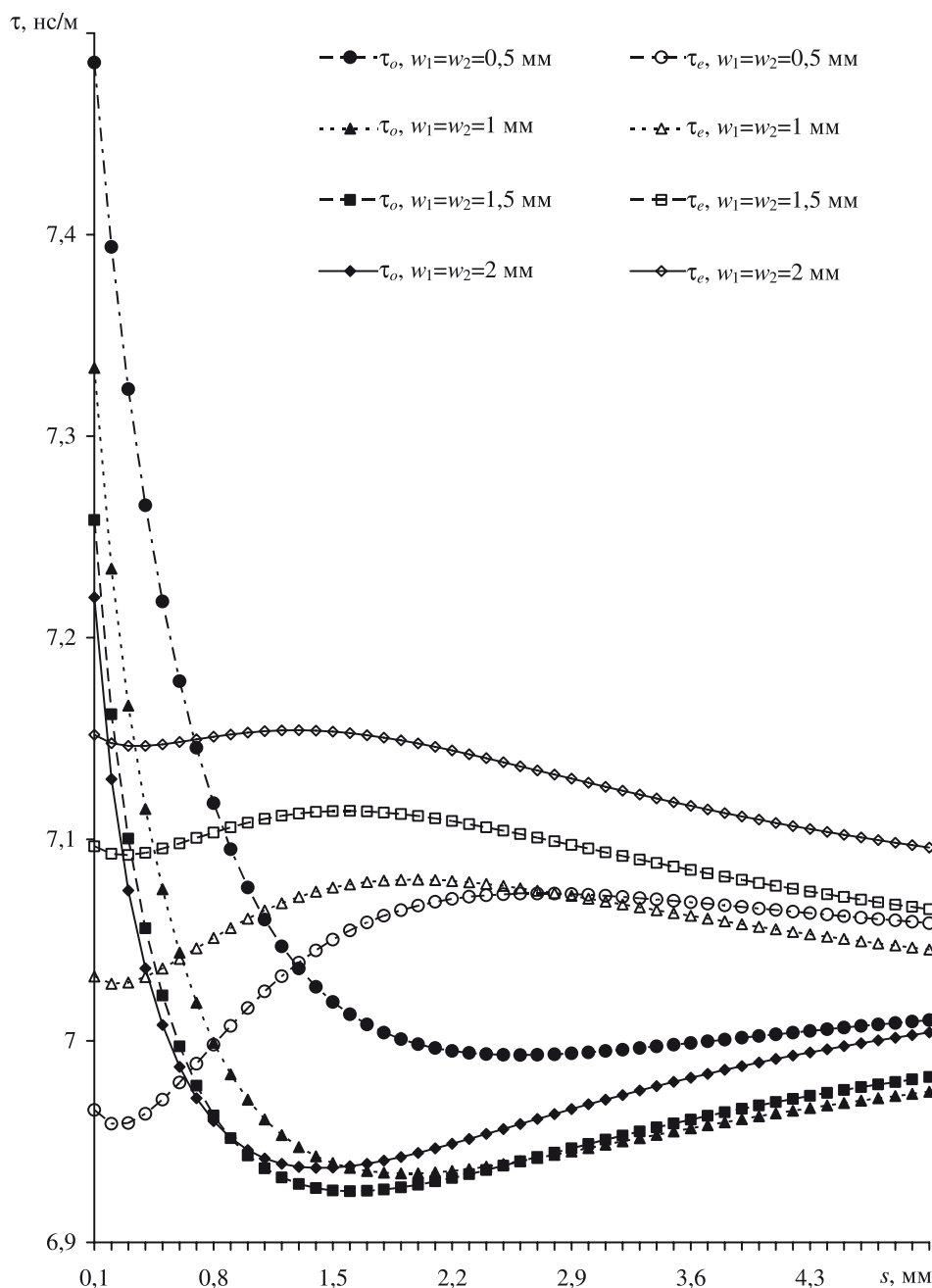


Рис. 2. Зависимости τ_e и τ_o от s при $w_1 = w_2 = 0,5...2 \text{ мм}$

s , при котором $\Delta\tau = 0$. На рис. 1 в показана зависимость s , при котором $\Delta\tau = 0$, от w . Видно, что чем больше s , тем меньше w . Следовательно, получить антипод с наименьшим разном проводников можно, увеличивая ширину.

Из данного раздела видно, что увеличение значений s и w влияет на такие параметры,

как τ_e , τ_o , $\Delta\tau$. Из всех рассмотренных структур в данном разделе, минимальное значение $\Delta\tau$ в структуре при $w_1 = w_2 = 0,5 \text{ мм}$ и $s = 0,1 \text{ мм}$ ($\Delta\tau_{\min} = -0,51976 \text{ нс/м}$), а максимальное — при $w_1 = w_2 = 2 \text{ мм}$ и $s = 1,4 \text{ мм}$ ($\Delta\tau_{\max} = 0,21701 \text{ нс/м}$). Результаты моделирования показывают, что антипод для структуры из двух отрезков может



возникнуть если, например, отрезки 1 и 2 имеют одинаковый разнос, но разную ширину проводников.

Исследование изменения значения диэлектрической проницаемости проводниковой структуры

В данном разделе представлены результаты моделирования варианта модального антипода кабеля АППВ-3×6, полученного погружением отрезка кабеля в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его изоляции [14].

В качестве исходной структуры выбран кабель марки АППВ-3×6, который широко используется в бытовых и промышленных сетях. Его поперечное сечение построено в системе TALGAT (рис. 3 а). Разность погонных задержек мод, при материале оболочки кабеля из ПВХ ($\epsilon_{r1} = 3$), составляет 0,337 нс/м.

Можно полагать, что самый простой вариант реализации антипода заданному кабелю – помещение его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{r2} большей, чем у изоляции кабеля ϵ_{r1} . Для проверки этого предположения выполнено вычисление погонных задержек мод кабеля для $\epsilon_{r2} = 1, 2, \dots, 10$ (рис. 3 б).

Из рис. 3 б видно, что значения погонных задержек при увеличении ϵ_{r2} от 1 до 3 сближаются. При $\epsilon_{r2} = 3$ они становятся равными, поскольку вся среда вокруг проводников становится однородной. При $\epsilon_{r2} > 3$ разность погонных задержек мод меняет свой знак на противоположный, поскольку τ_e становится меньше τ_o . Дальнейший рост ϵ_{r2} увеличивает разность погонных задержек.

Зависимость модуля разности погонных задержек мод $|\Delta\tau| = |\tau_e - \tau_o|$ от ϵ_{r2} представлена на рис. 3 в. Видно, что при увеличении ϵ_{r2} от 1 до 3 значение $|\Delta\tau|$ уменьшается до нуля, а при $\epsilon_{r2} > 3$ возрастает и примерно при $\epsilon_{r2} = 5,25$ становится равным исходному значению 0,33 нс/м. Дальнейший рост ϵ_{r2} увеличивает $|\Delta\tau|$ до 0,9 нс/м при $\epsilon_{r2} = 10$.

Таким образом, модальный антипод такого кабеля можно получить погружением его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его

изоляции (такой средой может быть, например, вода). Можно полагать, что чем больше $|\Delta\tau|$ модального антипода, тем меньшая длина отрезка кабеля антипода понадобится для реализации явления разложения и последующего восстановления импульса.

Исследование зависимости модуля разности погонных задержек мод от параметров дополнительного диэлектрического слоя проводниковой структуры

В данном разделе сведены результаты, показывающие влияние параметров (в более широком диапазоне ϵ_{r2}) дополнительного диэлектрического слоя на разность погонных задержек для кабеля марки АППВ-3×6. Продемонстрирован выбор параметров модальных антиподов, полученных добавлением слоя внешнего диэлектрика, для этого кабеля.

На рис. 4 а показано поперечное сечение антипода для кабеля марки АППВ-3×6 с дополнительным диэлектрическим слоем ϵ_{r2} толщиной $2H$. Область внешнего диэлектрического заполнения – воздух ($\epsilon_{r3} = 1$).

Модули разностей погонных задержек мод $|\Delta\tau|$ в зависимости от ϵ_{r2} для разных значений H представлены на рис. 4 б. Видно, что при увеличении толщины антипода $\Delta\tau$ меняет свой знак на противоположный при меньшем ϵ_{r2} . Отметим, что, чем больше толщина диэлектрического слоя антипода, тем меньшая длина отрезка-антипода понадобится для реализации явления РПВИ. Данный вариант реализации антипода представляется довольно практичным, поскольку его можно получить, например, простым наматыванием изолирующей ленты на кабель.

Исследование увеличения толщины воздушных промежутков между слоями изоляции проводниковой структуры

В данном разделе исследована возможность создания модального антипода за счет заполнения диэлектриком внутренних полостей [15].

Кабель марки ВВГп-3×1,5 имеет воздушные промежутки (ϵ_{r4}) между слоями изоляции кабеля и проводников (рис. 5 а).

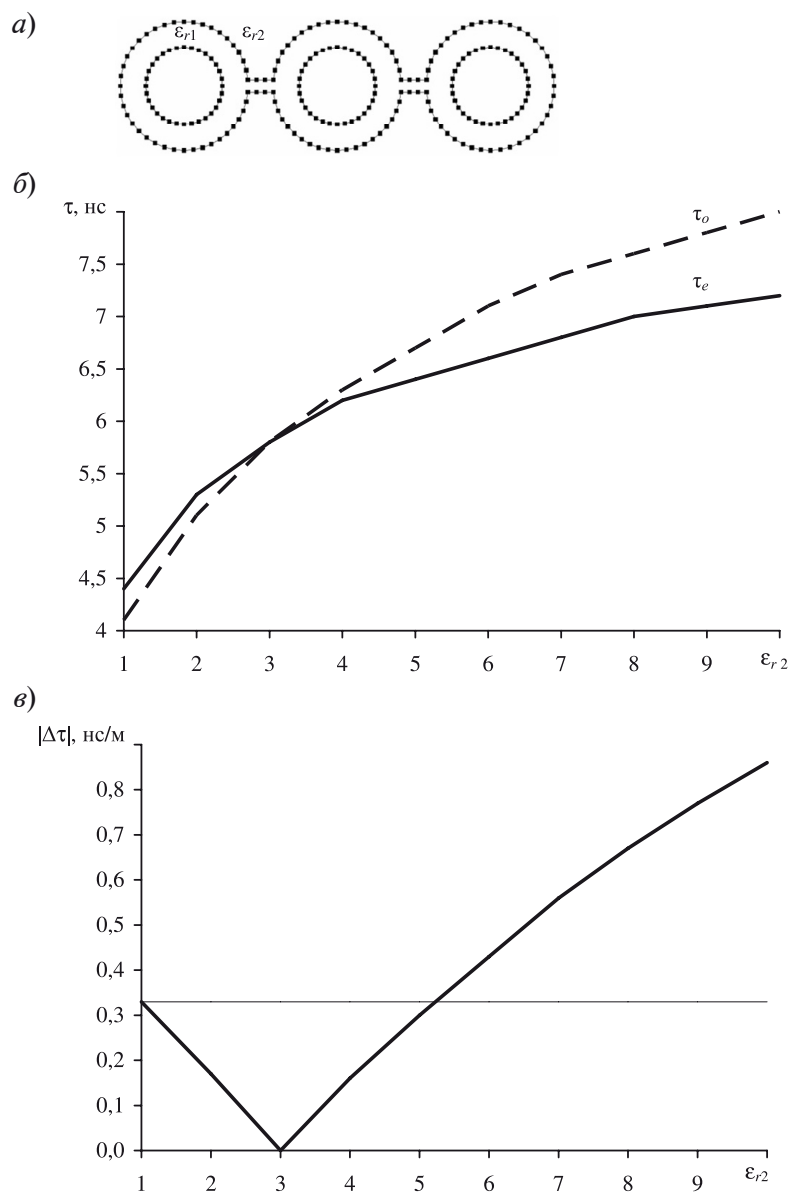


Рис. 3. Поперечное сечение кабеля марки АППВ-3×6 (а); зависимость погонных задержек мод от ϵ_{r2} : τ_o (---), τ_e (—) (б) зависимость $|\Delta\tau|$ от ϵ_{r2} (в)

Если заполнить воздушные промежутки средой с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у изоляции кабеля, то может получиться скрытый антипод, который трудно обнаружить, т. к. он находится под внешней оболочкой кабеля.

При моделировании полагалось, что $\epsilon_{r1} = 1$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3$, а значение ϵ_{r4} менялось от 1 до 82 с шагом 1,5. При заполнении кабеля может появиться (по крайней мере, гипотетически) зазор между оболочкой кабеля

и проводниками. Для оценки его влияния вычислены зависимости разности задержек мод для $H = 1,2$ мм (зазор отсутствует), $H = 1,22$ мм (зазор 0,02 мм), $H = 1,4$ мм (зазор 0,2 мм). На рис. 5 б показан увеличенный фрагмент зазора при толщине $H = 1,22$ мм, а вычисленные зависимости модуля разности задержек мод $|\Delta\tau|$ от ϵ_{r4} для разных H представлены на рис. 5 в.

Из рис. 5 в видно, что при $H = 1,2$ мм $|\Delta\tau|$ увеличивается от 0,32 нс/м при $\epsilon_{r4} = 1$

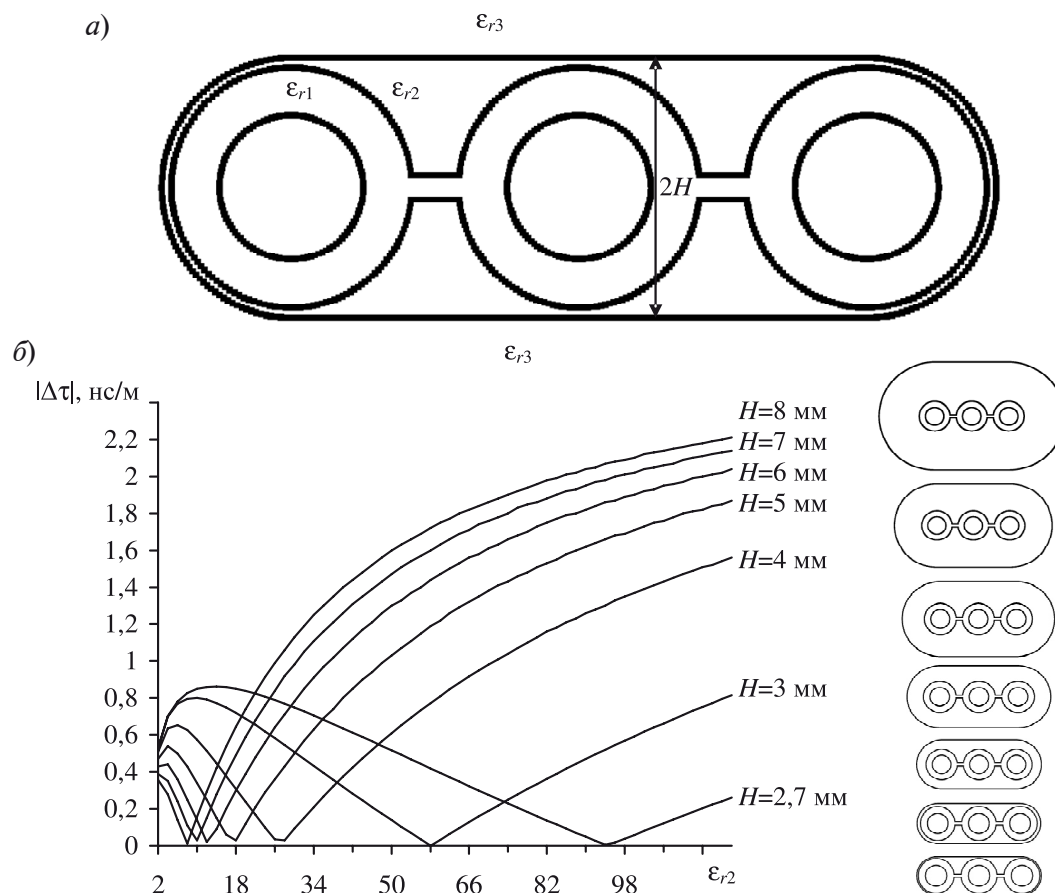


Рис. 4. Поперечное сечение антипода для кабеля марки АППВ-3×6 (а); зависимость $|\Delta\tau|$ от ε_{r2} и поперечные сечения структур при изменении H (б)

до 0,6 нс/м при $\varepsilon_{r4} = 15$, затем уменьшается во всем диапазоне $\varepsilon_{r4} = 15, \dots, 82$, однако до нуля так и не доходит, поскольку заполнение воздушных зазоров почти одинаково влияет на обе моды (τ_e и τ_o). Следовательно, антипода из данной структуры (какая она есть, без зазора) получить нельзя, и интересно оценить влияние зазора. При $H = 1,22$ мм $|\Delta\tau|$ увеличивается до 0,57 нс/м при $\varepsilon_{r4} = 10$ и уменьшается до нуля к концу диапазона $\varepsilon_{r4} = 10, \dots, 75$. Как видно, наличие малого зазора дает возможность получить антипод, однако данный антипод сделать трудно т. к. нужны значения $\varepsilon_{r4} > 75$ для последующего восстановления импульса. При $H = 1,4$ мм $|\Delta\tau|$ увеличивается до 0,53 нс/м при $\varepsilon_{r4} = 5$, затем уменьшается до нуля к концу диапазона $\varepsilon_{r4} = 5, \dots, 35$. При $\varepsilon_{r4} > 35$ значение $\Delta\tau$ меняет свой знак на противоположный, а примерно при

$\varepsilon_{r4} = 50$ становится равной по модулю исходному $|\Delta\tau|$. Дальнейший рост ε_{r4} увеличивает $|\Delta\tau|$. Это наилучший вариант антипода из рассмотренных. Как видно, увеличение зазора облегчает получение антипода.

Следовательно, создать антипод для кабеля ВВГп-3×1,5 без зазоров между слоями изоляции при $\varepsilon_{r4} \leq 82$ нельзя. Чтобы получить скрытый модальный антипод для такого кабеля, нужно увеличить толщину воздушных промежутков между слоями изоляции и заполнить их, например, водой. Однако на практике получить это сложно.

Исследование изменения геометрической формы проводниковой структуры

В данном разделе показана возможность создания антипода за счет изменения расположения проводников на примере кабеля марки АПВ 4. Вычислительный экспери-

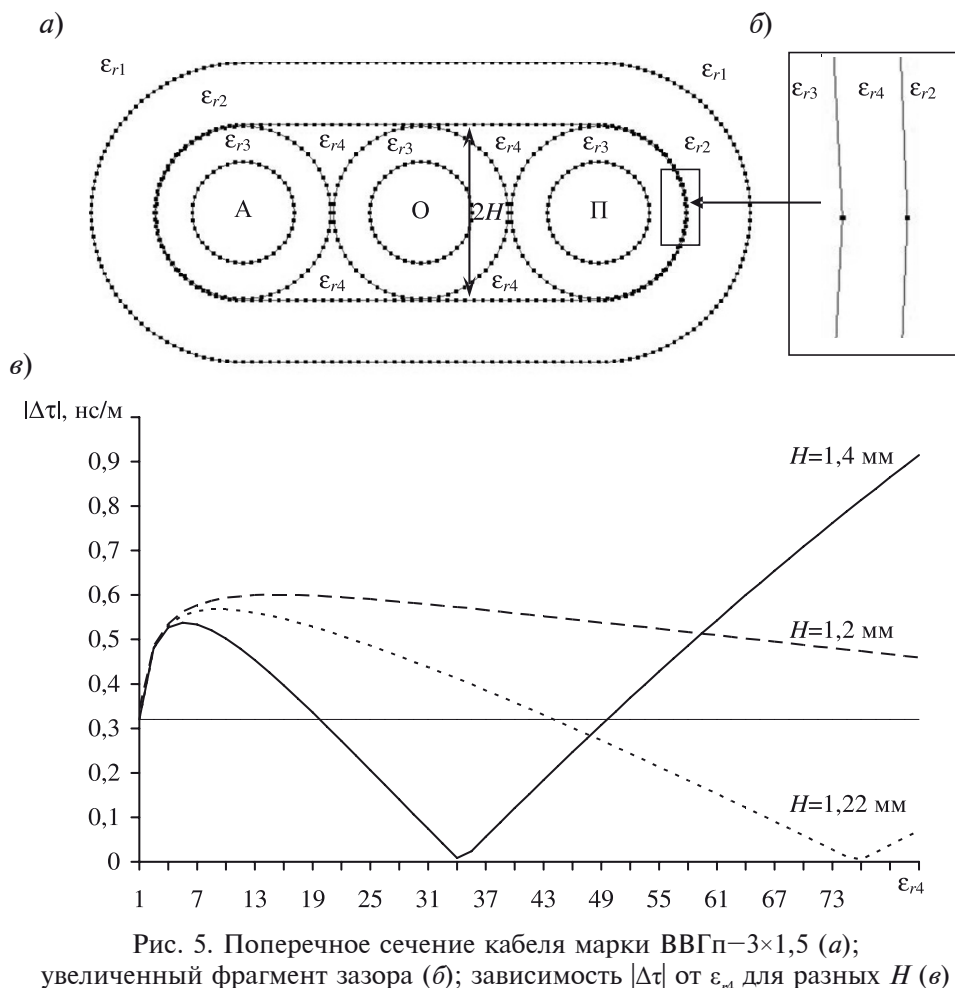


Рис. 5. Поперечное сечение кабеля марки ВВГп-3×1,5 (а);
увеличенный фрагмент зазора (б); зависимость $|\Delta\tau|$ от ϵ_{r4} для разных H (в)

мент на кабеле марки АПВ 4 выполнялся последовательно в три этапа, чтобы показать значение разности погонных задержек мод ($\Delta\tau = \tau_e - \tau_o$) одного знака, уменьшение $\Delta\tau$ до нуля и уменьшение $\Delta\tau$ со сменой знака [16].

Для этого изменялись параметры расположения проводников в исследуемом отрезке от плоской структуры (рис. 6 а) к центрально симметричной (рис. 6 б) и к структуре с двумя сближенными проводниками вдали от опорного (рис. 6 в).

Исследуемая конфигурация состоит из трех кабелей марки АПВ 4, расположенных так, что по форме они похожи на плоский трехпроводный кабель (рис. 6 а). В системе TALGAT построено поперечное сечение трех кабелей марки АПВ 4 (рис. 6 б, где s – расстояние между краями активного А и пассивного П проводников; h – высота,

на которую отодвигались вверх относительно опорного О активный и пассивный проводники. Диаметр проводника кабеля $d_1 = 2,2$ мм, диаметр кабеля (включая изолирующий слой) – $d_2 = 4$ мм.

Сначала исследовалось влияние изменения высоты h на τ_e , τ_o , $\Delta\tau$. Далее исследовалось влияние изменения расстояния s на τ_e , τ_o , $\Delta\tau$. В таблицах 1–3 представлены следующие результаты: зависимость τ_e , τ_o , $\Delta\tau$ от h при $s = 4$ мм; зависимость τ_e , τ_o , $\Delta\tau$ от s при $h = 3,46$ мм; зависимость τ_e , τ_o от h при $s = 0$ мм.

Анализ и обработка полученных числовых данных позволяют заключить следующее.

1. С увеличением значения h уменьшаются τ_e , τ_o , $\Delta\tau$.
2. Уменьшение s увеличивает τ_e , τ_o , однако $\Delta\tau$ стремится к нулю (но из-за погреш-

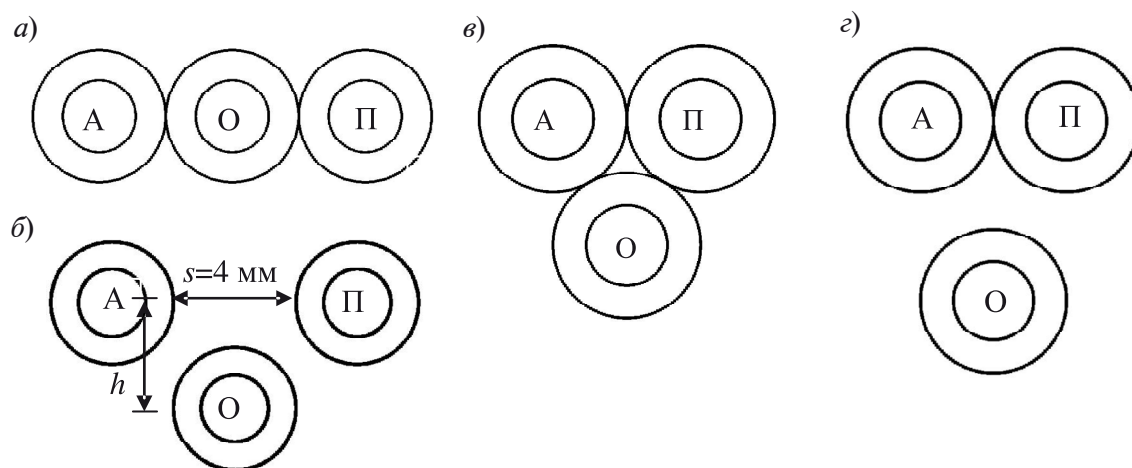


Рис. 6. Поперечное сечение отрезка из трех кабелей АПВ 4: при $s = 4$ мм, $h = 0$ мм (а); при $s = 4$ мм, $h = 3,46$ мм (б); при $s = 0$ мм, $h = 3,46$ мм (в); при $s = 0$ мм, $h = 5$ мм (г)

Таблица 1

Зависимость τ_e , τ_o , $\Delta\tau$ от h при $s = 4$ мм

Параметры	Значения					
h , мм	0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5
τ_e , нс/м	4,86419	4,78134	4,59907	4,40848	4,24725	4,12
τ_o , нс/м	4,39457	4,33293	4,20084	4,07145	3,97364	3,90766
$\Delta\tau$, нс/м	0,46962	0,44841	0,39823	0,33703	0,27361	0,21234

Таблица 2

Зависимость τ_e , τ_o , $\Delta\tau$ от s при $h = 3,46$ мм

Параметры	Значения					
s , мм	4	3,2	2,4	1,6	0,8	0
τ_e , нс/м	4,11841	4,19616	4,29623	4,42904	4,61263	4,88272
τ_o , нс/м	3,90232	3,96504	4,04971	4,17223	4,37561	4,87929
$\Delta\tau$, нс/м	0,21609	0,23112	0,24652	0,25681	0,23702	0,00343

Таблица 3

Зависимость τ_e , τ_o , $\Delta\tau$ от h при $s = 0$ мм

Параметры	Значения							
h , мм	3,46	3,48	3,5	3,52	3,54	5	10	40
τ_e , нс/м	4,88272	4,85456	4,82744	4,80158	4,77687	4,05252	3,69144	3,52285
τ_o , нс/м	4,87929	4,8697	4,86089	4,85261	4,84482	4,68033	4,65386	4,65262
$\Delta\tau$, нс/м	0,00343	-0,01514	-0,0335	-0,05103	-0,06795	-0,62781	-0,96242	-1,12977

ности вычислений $\Delta\tau = 0,00343$ нс/м).

3. Увеличение h уменьшает τ_e , τ_o , однако $\Delta\tau$ меняет свой знак на отрицательный.

Таким образом, при расположении ка-

белей по прямой $\Delta\tau \approx 0,5$ нс/м, центрально симметричном — $\Delta\tau \approx 0$ нс/м, при активном и пассивном вдалеке от опорного $\Delta\tau \approx -1$ нс/м.

Таким образом, исследовано пять вариантов реализации модальных антиподов за счет следующего.

1. Изменение расположения проводников на среднем слое МПП.
2. Изменение диэлектрической проницаемости окружающей среды.
3. Увеличение толщины диэлектрического слоя.
4. Заполнение диэлектриком внутренних полостей.
5. Изменение расположения проводников.

Ниже перечислены основные выводы по каждому из вариантов.

Модальный антипод можно получить, изменяя расположение проводников на среднем слое в МПП. Антипод для структуры из двух отрезков может возникнуть если, например, отрезки 1 и 2 имеют одинаковый разнос, но разную ширину проводников. Также антипод можно получить, если проводники отрезков будут иметь одинаковую ширину 1 и 2, но разный разнос.

Модальный антипод за счет изменения диэлектрической проницаемости окружающей среды для кабеля АППВ-3×6 можно получить погружением его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его изоляции (такой средой может быть, например, вода).

Модальный антипод за счет увели-

чения толщины диэлектрического слоя можно получить простым наматыванием изолирующей ленты на кабель. При увеличении толщины антипода Δt меняет свой знак при меньшем значении ϵ_r ленты. Чем больше толщина диэлектрического слоя антипода, тем меньшая длина отрезка-антипода понадобится для РПВИ. При этом существуют структуры антиподов, где зависимость Δt от ϵ_r ленты имеет максимум. Чем больше толщина, тем менее выражен этот максимум. Это позволяет при синтезе определенной структуры получить более высокое значение $|\Delta t|$ при меньшей толщине слоя диэлектрика.

Модальный антипод за счет заполнения диэлектриком внутренних полостей можно получить, заполнив воздушные промежутки (находящиеся под внешней оболочкой изолирующего слоя) средой с ϵ_r большей, чем у изоляции рассматриваемого кабеля.

Модальный антипод можно получить за счет изменения расположения проводников кабеля. Для этого нужно изменять параметры расположения проводников в исследуемом отрезке от плоской структуры к центрально симметричной, а затем к структуре с двумя сближенными проводниками вдали от опорного.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 16-38-00179.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизов Т.Р. Совершенствование межсоединений монтажных плат: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 1998. 164 с.
2. Газизов Т.Р. и др. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. № 11. С. 18–22.
3. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Модальный фильтр. Патент РФ № 79355. Приоритет 07.07.2008. Оpubл. 27.12.2008. Бюл. № 36.
4. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство защиты от импульсных сигналов. Патент РФ № 2431912. Приоритет 09.03.2010. Оpubл. 20.10.2011. Бюл. № 29.
5. Бевзенко И.Г. Среднеслойный фильтр. Патент РФ № 147789. Приоритет 17.02.2014.
6. Сахаров К.Ю. и др. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 3(18). С. 36–45.
7. Бевзенко И.Г., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальные антиподы плоских трехпроводных кабелей // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. № 11. С. 71–74.
8. Бевзенко И.Г., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Экспериментальные исследования раз-



ложения и восстановления электрических импульсов в структурах с различными модальными антиподами // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 10/2. С. 17–24.

9. Бевзенко И.Г. Методика защиты электронных устройств от сверхкоротких импульсов при их модальном разложении в соединительных линиях: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2012. 229 с.

10. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Костарев И.С. Устройство воздействия на аппаратуру. Патент РФ № 79213. Приоритет 07.07.2008. Оpubл. 20.12.2008. Бюл. № 35.

11. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Костарев И.С. Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов. Патент РФ № 2431897. Приоритет 09.03.2010. Оpubл. 20.10.2011. Бюл. № 29.

12. Бевзенко И.Г. Исследование модальных явлений на верхнем слое многослойной печатной платы // XV Междунар. науч.-практ.

конф. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. СПб., 2016. Т. 1. С. 135–140.

13. Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Заболоцкий А.М., Аширбакиев Р.И., Вершинин Е.А., Салов В.К., Лежнин Е.В., Орлов П.Е., Бевзенко И.Г., Калимулин И.Ф. Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012610712. TALGAT 2010. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13.01.2012.

14. Бевзенко И.Г., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р. Вариант антипода для кабеля марки АППВ-36 // Науч.-техн. конф. молодых специалистов Электронные и электромеханические системы и устройства. 2008. С. 69–71.

15. Бевзенко И.Г. Возможность создания скрытого модального антипода кабеля марки ВВГп-3×1,5 // VI Междунар. науч.-практ. конф. Электронные средства и системы управления. Томск, 2010. Т. 2. С. 27–30.

16. Кокнаев М.В., Бевзенко И.Г. Создание антипода за счет изменения расположения проводников на примере кабелей марки КГхЛ 1×2,5 и АПВ 4 // SIBCON – 2011, Красноярск, 2011. С. 399–402.

REFERENCES

1. Gazizov T.R. *Improving interconnect circuit boards: the dissertation of Ph.D.* Tomsk: TUSUR Publ., 1998, 164 p. (rus)

2. Gazizov T.R., et al. Study of modal pulse signal distortions in multi-wire lines with inhomogeneous dielectric filling, *Electromagnetic waves and electronic sistemy*, 2004, No. 11, Pp. 18–22. (rus)

3. Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., P.E. Orlov, Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S. *Modal filter*. Russian Federation utility model patent No. 79355, The priority of the utility model 07.07.2008, Publ. on 27.12.2008, Bull. No. 36. (rus)

4. Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., P.E. Orlov, Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S. *Protection unit pulse signals*. Russian Federation patent for invention No. 2431912, The priority of invention 09.03.2010, Publ. on 20.10.2011, Bull. No. 29. (rus)

5. Bevzenko I.G. *Average layer filter*. Russian utility model patent No. 147789. The priority of the utility model 17.02.2014. (rus)

6. Sakharov K.Y., et al. Study the functioning of the local area network under the action of ultrashort electromagnetic pulse, *EMC Technology*, 2006, No. 3(18), Pp. 36–45. (rus)

7. Bevzenko I.G., Gazizov T.R., Zabolochiy

A.M. Modal antipodes flat three-wire cables, *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2011, No. 11, Pp. 71–74. (rus)

8. Bevzenko I.G., Gazizov T.R., Zabolochiy A.M. Experimental studies of decomposition and recovery of electrical impulses in the structures with different modal antipodes, *Proceedings of the universities. Physics*, 2011, Vol. 54, No. 10(2), Pp. 17–24. (rus)

9. Bevzenko I.G. *Methods of protecting electronic devices from the ultrashort pulses in their modal decomposition in the connection lines: the dissertation of Ph.D.* Tomsk: TUSUR Publ., 2012, 229 p. (rus)

10. Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., Orlov P.E., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S. *The unit impact on the equipment*. Russian Federation utility model patent No. 79355, The priority of the utility model 07.07.2008, Publ. 20.12.2008, Bull. No. 35. (rus)

11. Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., Orlov P.E., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S. *Device malfunction of equipment due to the decomposition and recovery pulse*. Russian Federation patent No. 2431897, The priority of invention 09.03.2010, Publ. on 20.10.2011, Bull. No. 29. (rus)

12. Bevzenko I.G. Investigation of modal phenomena in the upper layer of the multilayer

printed circuit board, *XV International Scientific and Practical Conference Fundamental and applied research in the modern world*, St. Petersburg, 2016, Vol. 1, Pp 135–140. (rus)

13. **Gazizov T.R., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Zabolochiy A.M., Ashirbakiev R.I., Vershinin E.A., Salov V.K., Lezhnin E.V., Orlov P.E., Bevzenko I.G., Kalimulin I.F.** *Certificate of state registration of the computer No. 2012610712. TALGAT 2010*. 26.09.2011. (rus)

14. **Bevzenko I.G., Zabolochiy A.M., Gazizov T.R.** Option antipode of the brand of cable APPV-36. *Scientific and technical conference of young*

specialists Electronic and electromechanical systems and devices, 2008, Pp 69–71. (rus)

15. **Bevzenko I.G.** Ability to create hidden modal brand VVGp antipode cable 3×1,5, *VI International Scientific and Practical Conference Electronic instrumentation and control systems*. Tomsk, 2010, Vol. 2, Pp. 27–30. (rus)

16. **Koknaev M.V., Bevzenko I.G.** Creating antipode by changing the arrangement of the conductors in the cable brand KGhL 1×2.5 and APV 4. *Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON – 2011)*, Krasnoyarsk, 2011, Pp. 399–402. (rus)

БЕВЗЕНКО Иван Геннадьевич — старший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: ivan-bevzenko@yandex.ru

BEVZENKO Ivan G. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: ivan-bevzenko@yandex.ru

**ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ЕМКОСТНОГО ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА**

Yu.A. Andryakov, A.A. Anikina, Ya.V. Belyaev

**ARCHITECTURE SELECTION AND PARAMETER CALCULATION
OF A CAPACITIVE DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER
FOR A MICROMECHANICAL ACCELEROMETER**

Рассмотрена методика выбора архитектуры емкостного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), входящего в состав аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения для интегральной схемы микромеханического акселерометра. При решении задачи выбора архитектуры емкостного ЦАП рассматривается подкласс бинарных архитектур по способу конфигурации единичных элементов в массиве ЦАП. Методика основана на анализе технологических, технических и топологических ограничений, а также на расчете параметров ЦАП. При расчете параметров учитывались ограничения по тепловому шуму, технологическому разбросу, правилам проектирования, а также ограничения по площади и быстродействию. Предлагаемая методика может использоваться на раннем этапе проектирования аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения.

ЕМКОСТНЫЙ ЦАП; АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ; МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР; АРХИТЕКТУРА ЦАП.

The article consider the procedure of selecting the architecture for a capacitive digital-to-analog converter (DAC) used in a successive approximation analog-to-digital converter (SAR ADC) for a micromechanical accelerometer. In comparison with the existing methods, the proposed method is based on analyzing not only the technical and technological requirements of the IC but also the technical requirements of the sensor, layout restrictions, and on calculating the parameters of the DAC. The proposed method has been used in SAR ADC design for a charge-balanced capacitive micromechanical accelerometer with measurement range of 10 g and threshold of sensitivity of 0.02 g for the bandwidth of 300 Hz. The presented method can be used in the early design stage for DAC architecture selection used in SAR ADC.

CAPACITIVE DAC; SUCCESSIVE APPROXIMATION ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (SAR ADC); MICROMECHANICAL ACCELEROMETER; DAC ARCHITECTURE.

В состав микромеханического акселерометра входит чувствительный элемент и специализированная интегральная схема (ИС), состоящая из аналоговых, цифровых и аналого-цифровых блоков. Одним из блоков ИС является аналого-цифровой преоб-

разователь (АЦП), параметры которого существенно влияют на точность датчика.

При проектировании АЦП в составе ИС необходимо учитывать статистический разброс технологических параметров, паразитные эффекты топологической реали-

зации блока, влияние функционирования цифровой части на аналоговую часть АЦП [1]. При этом АЦП микромеханического акселерометра (ММА) целесообразно разрабатывать с учетом технических требований к ММА в целом, его архитектуры и характеристик отдельных блоков, входящих в состав ИС.

На раннем этапе проектирования АЦП основной задачей является определение его структуры и архитектуры входящих в его состав блоков. Ошибка в определении архитектуры блоков может привести к увеличению временных затрат при разработке и увеличению числа конструктивных решений. Существующие методики выбора структуры АЦП и архитектуры входящих в его состав блоков, как правило, опираются на экспертную оценку и на опыт предыдущих разработок [2], либо основаны на переборе всех разработанных схемотехнических решений блоков [3]. Характеристики АЦП во многом определяются выбором архитектуры входящих в его состав блоков и, прежде всего, выбором архитектуры ЦАП.

В статье предложены методики выбора архитектуры емкостного ЦАП, входящего в состав аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения на основе значений рассчитываемых параметров ЦАП, а также результатов анализа техниче-

ских требований к датчику и ИС, технологических и топологических ограничений.

Общее описание методики

АЦП последовательного приближения содержит компаратор, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), устройство выборки и хранения, регистр последовательного приближения. Регистр последовательного приближения осуществляет алгоритм последовательного приближения, генерируя текущее значение кода, подающегося на вход ЦАП [4]. Цифро-аналоговый преобразователь – основная часть АЦП последовательного приближения, может реализовываться на основе различных элементов: конденсаторов, резисторов и др. Наиболее популярными являются ЦАП с емкостной архитектурой, поскольку в современных технологиях КМОП конденсаторы обладают меньшим технологическим разбросом, чем резисторы.

При описании предложенной методики рассматриваются архитектуры недифференциального емкостного ЦАП, не предполагающие цифровую компенсацию: двоично-взвешенный массив (Binary Weighted) [5, 6] (рис. 1 а); двухступенчатый массив (Split Binary Weighted) [7–9] (рис. 1 б); разделенный массив ЦАП на N ступеней [4] (рис. 1 в); массив ЦАП С2С [10] (рис. 1 г).

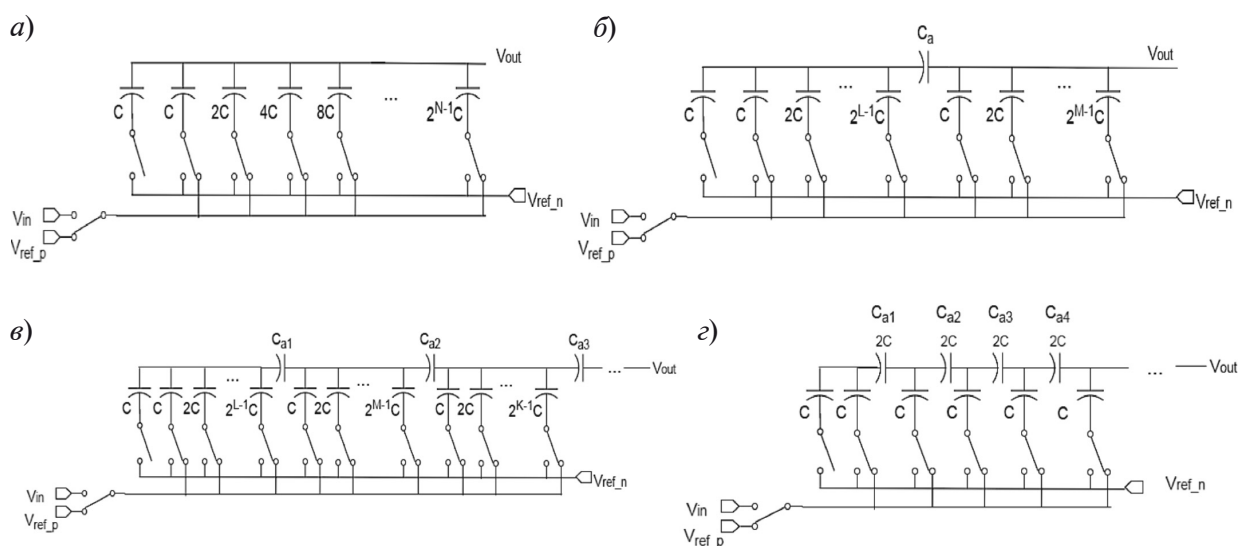


Рис. 1. Рассматриваемые архитектуры ЦАП: а – двоично-взвешенный массив ЦАП; б – двухступенчатый массив ЦАП; в – N -ступенчатый массив ЦАП; г – массив ЦАП С2С



Однако данная методика может быть применима и для других архитектур ЦАП.

Для уменьшения временных затрат на проектирование всех архитектур ЦАП и последующего их перебора предлагается:

1) проанализировать технологические, технические и топологические ограничения для определения возможности реализации ЦАП в составе АЦП;

2) аналитически определить для всех рассматриваемых архитектур ЦАП минимально допустимые значения емкостей конденсаторов, удовлетворяющие ограничениям по тепловому шуму, технологическому разбросу, правилам проектирования, по площади и по быстродействию;

3) на основании результатов анализа и расчетов наименьших значений емкости ЦАП определить предполагаемые характеристики всего АЦП: площадь, энергопотребление, ожидаемое число эффективных бит, частота преобразования и нелинейность;

4) выбрать архитектуру ЦАП, АЦП в составе с которым обладает характеристиками, удовлетворяющими поставленным требованиям, а также имеющего по сравнению с другими архитектурами наименьшие значения емкостей конденсаторов.

Методика позволяет сократить временные ресурсы на начальном этапе проектирования и выбрать одну архитектуру для ее дальнейшей разработки на схемотехническом уровне.

Анализ технических, технологических и топологических ограничений

При анализе технических требований необходимо учесть требования к датчику по точности, линейности, полосе пропускания, диапазону измерений, а также требования к ИС: площадь, энергопотребление, разрядность данных. На основании анализа формируются требования к АЦП: разрядность N , число эффективных бит $ENOB$, частота преобразования АЦП f_{ADC} , нелинейность INL , DNL , площадь S_{ADC} .

Требования датчика по точности и диапазону измерений формируют требования по разрядности данных ИС. Полоса пропускания датчика непосредственно влияет

на минимальную частоту преобразования АЦП. Необходимость использования АЦП как для съема данных с разомкнутого датчика, так и в составе компенсационного требует от АЦП умеренного отношения его точности к быстродействию. Для уменьшения площади, занимаемой в интегральной схеме, в датчиках используется блок АЦП с временным разделением съема нескольких входных сигналов, например, для дополнительного снятия температуры. Для достижения временного разделения требуется отсутствие задержки при формировании цифрового кода в АЦП.

При анализе технологических ограничений необходимо учесть тип допустимых конденсаторов, технологический разброс емкости A_C , минимально допустимый размер и удельную емкость D конденсатора. Выбранный технологический процесс может содержать несколько типов конденсаторов, отличающихся друг от друга перечисленными выше параметрами. Поэтому расчет параметров ЦАП необходимо проводить для каждого из имеющихся типов конденсаторов. Также необходимо учитывать максимальную частоту цифровой части или максимальную задержку в стандартных элементах. Максимальная частота цифровой части определяет верхнюю границу частоты преобразования АЦП:

$$T = \frac{1}{f_{ADC} \cdot N + 2} > T_{\min}, \quad (1)$$

где T – период цифровой части АЦП; $T_{\min}$ – минимально возможный период тактового сигнала в выбранной технологии; N – разрядность АЦП; f_{ADC} – частота преобразования АЦП.

При проектировании топологии массива конденсаторов ЦАП обычно для уменьшения технологического разброса используют топологию с общим центром, а также элементы «болванки» (dummy) [11]. Создание топологии в таком случае для сегментированных архитектур становится нетривиальной задачей. Для упрощения топологической реализации емкость мостовых конденсаторов может быть выбрана идентичной с единичным конденсатором. Также при раз-

работке топологии необходимо учитывать форму обкладок конденсатора.

Расчет параметров ЦАП

Определение параметров ЦАП подразумевает расчет значений емкостей конденсаторов, входящих в структуру ЦАП: определение наименьшего значения емкости единичного конденсатора, из которого собираются конденсаторы для каждой ветви ЦАП, соответствующей разрядам, а также емкости мостовых (разделительных) конденсаторов, если они имеются. Для определения значений емкостей конденсаторов каждой архитектуры ЦАП на начальном этапе проектирования необходимо для каждой выбранной архитектуры вычислить минимальное значение емкости единичного и мостового конденсатора из ограничений по тепловому шуму, технологическому разбросу, правилам проектирования, а также ограничений по площади и быстродействию [12].

Для определения наименьшего значения емкости потребуется значение общей емкости ЦАП C_{DAC} , которое для каждой архитектуры ЦАП может быть выражено через емкость единичного конденсатора C .

Определение наименьшего значения емкости из ограничений по тепловому шуму. Тепловой шум является существенным ограничением при проектировании блоков ИС, он не может быть устранен путем ввода цифровой коррекции, увеличив сложность схемы и мощность потребления [13]. Тепловой шум для массива конденсаторов ЦАП при выборке входного сигнала (sampling phase) может быть вычислен по формуле [14, 15]:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{K \cdot T}{C_{DAC}}} < \frac{1}{2} LSB, \quad (2)$$

где C_{DAC} – общая емкость ЦАП; k – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Для того чтобы определить границу для наименьшего значения емкости единичного и мостового конденсатора для каждой из архитектур из ограничений по тепловому шуму необходимо выразить емкость C из формулы (2). Для емкости массива ЦАП C_{DAC} ограничение примет вид:

$$C_{DAC} > \frac{K \cdot T}{(0,5 \cdot LSB)^2}, \quad (3)$$

где C_{DAC} – общая емкость ЦАП; k – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Определение наименьшего значения емкости из ограничений по технологическому разбросу. Из-за технологического разброса емкость конденсатора является независимой случайной величиной с математическим ожиданием C и среднеквадратическим отклонением σ (формула Пелгрона):

$$\sigma \left(\frac{\Delta C}{C} \right) = \frac{A - C}{\sqrt{WL}} = \frac{A - C \cdot \sqrt{D}}{\sqrt{C}}, \quad (4)$$

где D – удельная емкость конденсатора; W , L – ширина и длина конденсатора соответственно; $A - C$ – технологический разброс емкости конденсатора.

Для M конденсаторов, включенных параллельно, изменение емкости, вызванное технологическим разбросом, будет равно [14]:

$$\Delta C_M = C \sqrt{2^M} \sigma \alpha = \sqrt{C} \cdot \sqrt{2^M} \cdot A - C \sqrt{D} \cdot \alpha, \quad (5)$$

где α – уровень достоверности (для 99,7 % $\alpha = 3 \div 3,5$) [14]; $A - C$ – технологический разброс емкости конденсатора; D – удельная емкость конденсатора.

Для каждой архитектуры необходимо рассчитать напряжение на выходе ЦАП с учетом технологического разброса, используя выражение (5). Напряжение на выходе ЦАП должно быть меньше предполагаемой ошибки ЦАП, которую обычно выбирают равной 0,5 младшего значащего разряда [14]. Для АЦП с двухсегментным массивом ЦАП ограничение примет вид:

$$\frac{C_{li} \cdot C_a}{C_L \cdot C_a + (C_L + C_a) \cdot C_M} - \frac{(C_{li} + \Delta C_{li}) \cdot (C_a + \Delta C_a)}{(C_L + \Delta C_L) \cdot (C_a + \Delta C_a) + (C_L + \Delta C_L + C_a + \Delta C_a) \cdot (C_M + \Delta C_M)} < \frac{1}{2} LSB, \quad (6)$$

$$\frac{(C_L + C_a) \cdot C_{mi}}{C_L \cdot C_a + (C_L + C_a) \cdot C_M} - \frac{(C_L + \Delta C_L + C_a + \Delta C_a) \cdot (C_{mi} + \Delta C_{mi})}{(C_L + \Delta C_L) \cdot (C_a + \Delta C_a) + (C_L + \Delta C_L + C_a + \Delta C_a) \cdot (C_M + \Delta C_M)} < \frac{1}{2} LSB, \quad (7)$$

где C_a — емкость мостового конденсатора; C_{li} — емкость конденсаторов младшего массива (от 1 до L , где L — количество разрядов в младшем массиве); C_{mi} — емкость конденсаторов старшего массива (от $L + 1$ до $M + L$, где M — количество разрядов в старшем массиве).

Определение наименьшего значения емкости из ограничений по площади. Основную площадь в блоке АЦП последовательного приближения на переключаемых конденсаторах занимает ЦАП, который может составлять не менее 1/3 всей площади АЦП, причем лишь 60–70 % занимают конденсаторы, остальная площадь расходуется на трассировку. Предполагается, что топология ЦАП будет выполнена с общим центром (common centroid). Поэтому приблизительно можно оценить наименьшее значение конденсаторов ЦАП следующим образом:

$$C < \frac{0,6 \cdot SD}{3 \cdot Num_C}, \quad (8)$$

где S — площадь блока; D — удельная емкость конденсатора; Num_C — количество единичных конденсаторов.

Определение наименьшего значения емкости из ограничений по быстродействию. Ограничение на емкость массива ЦАП может быть найдено из выражения:

$$C_{DAC} < \frac{1}{\frac{f_{ADC} \cdot (N + 2)}{(N + 1) \cdot \ln(2) \cdot R_{switch}}}, \quad (9)$$

где N — разрядность АЦП; f_{ADC} — частота преобразования; R_{switch} — сопротивление ключей, коммутирующих массив конденсаторов.

Выражение (9), позволяющее определить верхнюю границу емкости ЦАП для заданных технических требований и выбранного технологического процесса, было получено с учетом рассмотрения переходного процесса установления выходного сигнала.

Выбор архитектуры ЦАП для АЦП последовательного приближения

Методика использовалась при проектировании АЦП последовательного при-

ближения с перераспределением заряда для интегральной схемы ММА компании АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Методика автоматизирована с использованием программной среды Matlab. Блок АЦП последовательного приближения предназначен для интегральной схемы микромеханического акселерометра с компенсацией по изменению заряда с диапазоном измерений ± 10 g, полосой пропускания 300 Гц и порогом чувствительности 0,02 g.

По результатам анализа ограничений выбранной технологии 350 нм и технических требований были сформулированы требования к АЦП по разрядности данных в 12 бит, по частоте преобразования более 600 Гц. Ограничениями по площади блока АЦП является 500 x 600 мкм. Нелинейность блока АЦП (интегральная и дифференциальная) должна быть меньше двух младших разрядов (LSB). Для упрощения топологической реализации ЦАП с общим центром введено ограничение, связанное с одинаковым значением мостового и единичного конденсатора ($C_a = C$).

Результаты расчета. Зависимость отклонения напряжения на выходе ЦАП от емкости единичного конденсатора с учетом технологического разброса, а также ограничения по площади, тепловому шуму и быстродействию для архитектуры двоично-взвешенного ЦАП и двух ступенчатого ЦАП представлены на рис. 2. Пересечение зависимости отклонения напряжения на выходе ЦАП от емкости единичного конденсатора с учетом технологического разброса и прямой, соответствующей напряжению, равному 0,5 LSB, определяет минимально допустимое значение емкости единичного конденсатора. Из рис. 2 а видно, что архитектура двоично-взвешенного ЦАП не удовлетворяет ограничению по площади для минимально допустимого значения емкости единичного конденсатора 30 фФ.

С использованием предлагаемой методики была выбрана архитектура АЦП с двухступенчатым массивом ЦАП. Для сокращения площади ЦАП каждая ступень массива содержит по 6 разрядов. Количе-

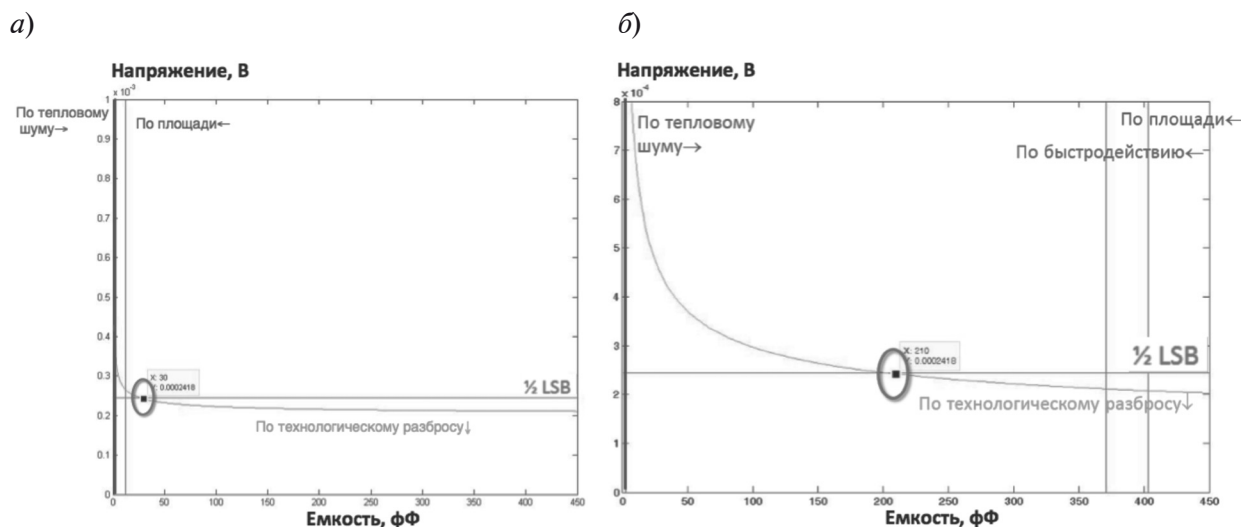


Рис. 2. Результаты вычислений емкости единичного конденсатора ЦАП:
а — для двоично-взвешенного ЦАП; б — для двухступенчатого ЦАП

ство единичных конденсаторов массива с младшими разрядами составляет 64, а массива со старшими — 63. Для данной архитектуры емкость единичного конденсатора с обкладками из поликремния целесообразно выбрать больше 210 фФ — пересечение зависимости отклонения выходной характеристики ЦАП от емкости единичного конденсатора с учетом технологического разброса (рис. 2 б). Для 8-угольного кон-

денсатора для обеспечения целых значений его сторон была выбрана емкость единичного и мостового конденсатора равной 256 фФ.

Результаты моделирования в программной среде Cadence Virtuoso показали, что дифференциальная и интегральная нелинейность INL и DNL блока АЦП меньше 2 LSB (см. рис. 3 и 4). Результаты моделирования блока АЦП методом Монте-Карло

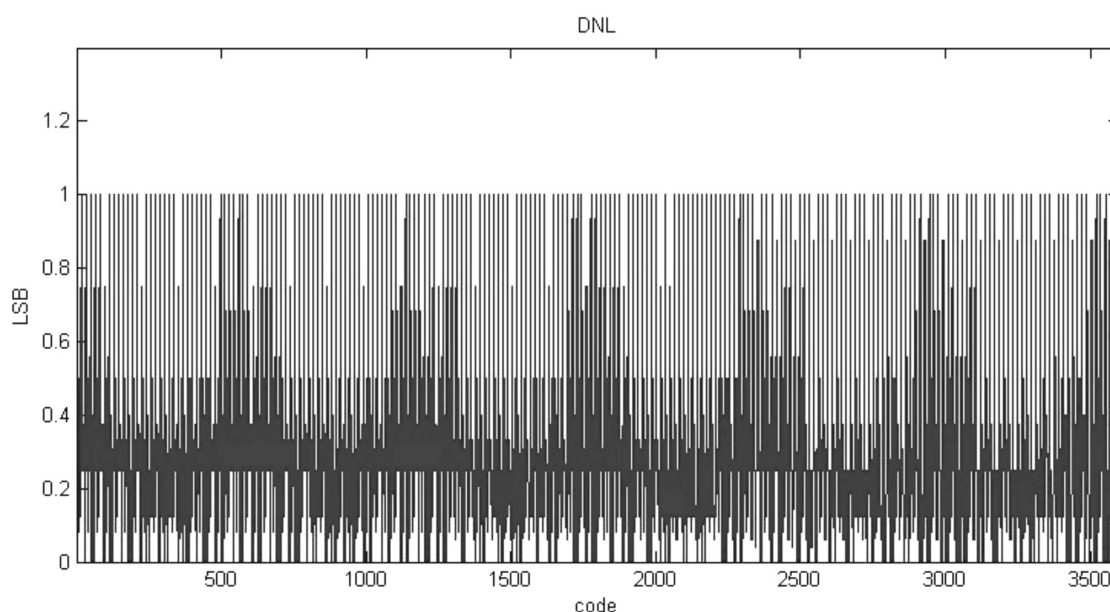


Рис. 3. Зависимость DNL от значений выходного кода

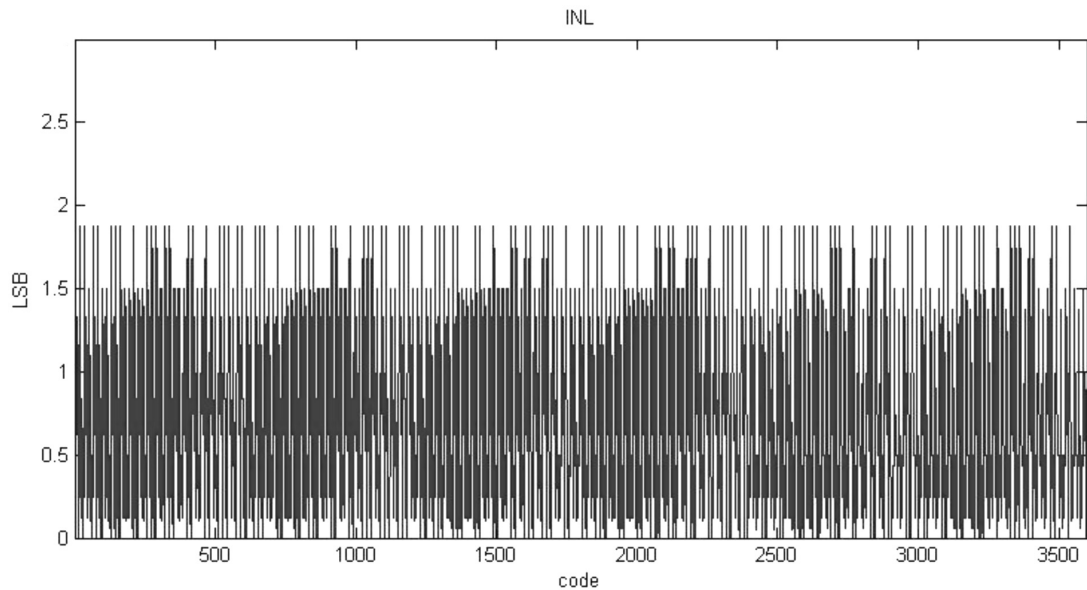


Рис. 4. Зависимость INL от значений выходного кода

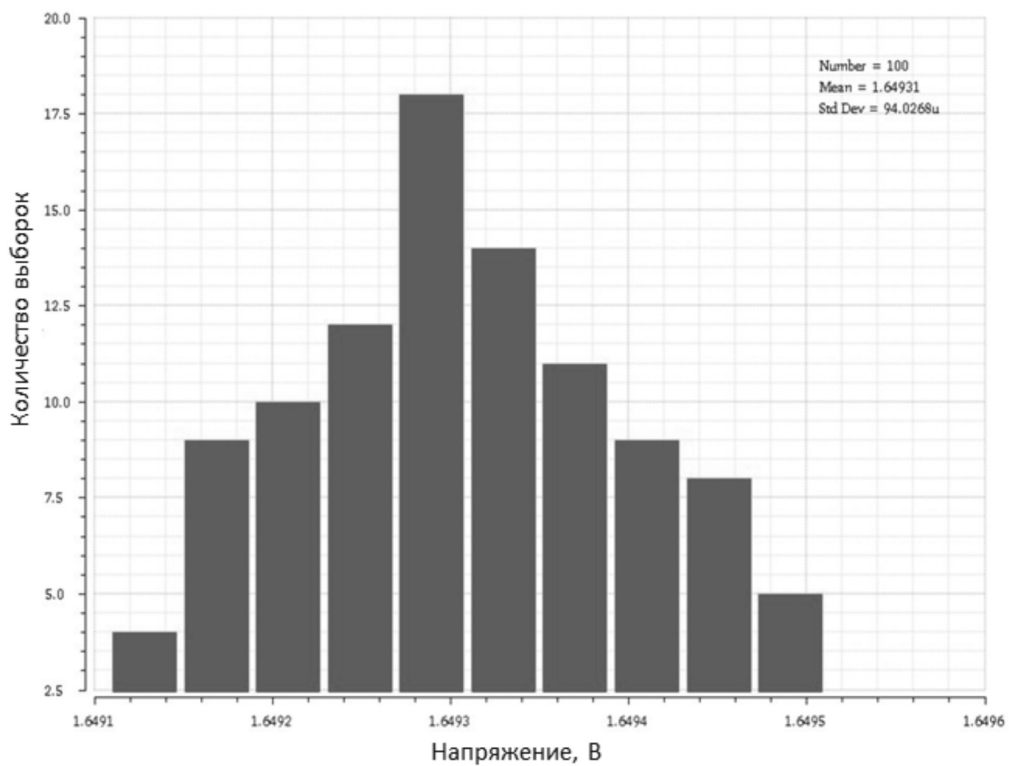


Рис. 5. Результаты моделирования методом Монте-Карло выходной характеристики массива конденсаторов ЦАП
vref_p = 2,65, verf_n = 0,65, sw = 10 00000 00000

показали, что максимальная ошибка выходной характеристики сегментированно-

го ЦАП (при переходе из 01 11111 11111 в 10 00000 00000, когда переключаются

все конденсаторы ЦАП), связанная с технологическим разбросом, меньше 2 LSB (см. рис. 5). В результате анализа результатов сделан вывод, что блок АЦП с выбранной архитектурой ЦАП удовлетворяет поставленным требованиям.

Представлена методика выбора архитектуры емкостного ЦАП, входящего в состав АЦП последовательного приближения интегральной схемы для микромеханического акселерометра. Методика основана на анализе технических требований, технологических и топологических ограничений и оценке рассчитанных параметров ЦАП. Методика выбора архитектуры емкостного ЦАП в составе АЦП использовалась при

проектировании АЦП последовательного приближения для интегральной схемы микромеханического акселерометра с компенсацией по изменению заряда с диапазоном измерений ± 10 g и порогом чувствительности в 0,02 g для полосы пропускания 300 Гц. Приведенные результаты моделирования АЦП подтверждают, что АЦП последовательного приближения с выбранной архитектурой ЦАП удовлетворяет поставленным требованиям. Предлагаемая методика может использоваться на раннем этапе проектирования для выбора архитектуры ЦАП аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00640.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабаров П.С. и др. Проектирование сложнотехнологических блоков смешанного сигнала на основе субмикронной технологии на примере микросхемы видеodeкодера. Ч. 1. Конструкция и топология микросхемы // Вестник СибГУТИ. 2011. № 2. С. 23–34.
2. Kester W. Which ADC Architecture Is Right for Your Application? [Электронный ресурс] / URL: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html> (Дата обращения: 01.10.2016).
3. Boina S., Paily R. Comparison of DAC architectures of SAR ADCs // 4th Internat. Conf. on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom2012). Bangalore, India, 2012. Pp. 38–43.
4. Zheng Y., Wang Z., Yang S., Li Q., Xiang L. A Novel Two-Split Capacitor Array with Linearity Analysis for High-Resolution SAR ADCs // Internat. J. of Electronics and Electrical Engineering. 2015. Vol. 3. No. 3.
5. McCreary J.L., Gray P.R. All-MOS Charge Redistribution Analog-to-Digital Conversion Techniques. Part I // IEEE J. of Solid-State Circuits. 1975. Vol. 10. No. 6. Pp. 371–379.
6. Suarez R.E., Gray P.R., Hodges D.A. All-MOS charge-redistribution analog-to-digital conversion techniques. Part II // IEEE J. of Solid-State Circuits. 1975. Vol. 10. No. 6. Pp. 379–385.
7. Ginsburg B.P., Chandrakasan A.P. 500-MS/s 5-bit ADC in 65-nm CMOS With Split Capacitor Array DAC // IEEE J. of Solid-State Circuits. 2007. Vol. 42. No. 4. Pp. 739–747.
8. Son W.L., Majid H.A., Musa R. High-Resolution 12-Bit Segmented Capacitor DAC in Successive Approximation ADC // Internat. J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2012. Vol. 6. No. 12.
9. Pei Xiaomin, Zhang Jun. Design and Optimization on the Interior DAC of SAR ADC // Internat. Conf. on Information Management and Engineering (ICIME 2011). Singapore. 2012. Vol. 52.
10. Cong L., Black W.C. A New Charge Redistribution D/A and A/D Converter Technique-Pseudo C2C Ladder // Proc. 43rd IEEE Midwest Symp. on Circuits and Systems. 2000.
11. Baker R.J. CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation. Wiley-IEEE Press, 2010. 1208 p.
12. Saberi M., Lotfi R., Mafinezhad K., Wouter A. Analysis of Power Consumption and Linearity in Capacitive Digital-to-Analog Converters Used in Successive Approximation ADCs // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2011. Vol. 58. No. 8. Pp. 1736–1748.
13. Lin Y., Zaniopoulos Z., Doris K., Hegt H. A power-optimized High-Speed and High-Resolution pipeline ADC with a Parallel Sampling First Stage for Broadband Multi-carrier Systems. 2014.
14. Xicai Yue. Determining the reliable minimum unit capacitance for the DAC capacitor array of SAR ADCs // Microelectronics Journal. 2013. Vol. 44. No. 6. Pp. 473–478.
15. Zhang W.P., Tong X. Noise Modeling and Analysis of SAR ADCs // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2015. Vol. 23. Iss. 12.

REFERENCES

1. **Khabarov P.S., et al.** Projektirovaniye slozhnofunktsionalnykh blokov smeshannogo signala na osnove submikronnoy tekhnologii na primere mikroskhemy videodekoda. Chast 1. Konstruktsiya i topologiya mikroskhemy. [Mixed-Signal Video Encoder Integrated Circuit Design Based on Sub-Micron Technology. Part 1. Device Design and Layout]. *Vestnik SibGUTI [The Herald of SibSUTIS]*, 2011, No. 2, Pp. 23–34. (rus)
2. **Kester W.** Which ADC Architecture Is Right for Your Application? Available: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/the-right-adc-architecture.html> (Accessed: 01.10.2016).
3. **Boina S., Paily R.** Comparison of DAC architectures of SAR ADCs. *4th International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom2012)*, Bangalore, India, 2012, Pp. 38–43.
4. **Zheng Y., Wang Z., Yang S., Li Q., Xiang L.** A Novel Two-Split Capacitor Array with Linearity Analysis for High-Resolution SAR ADCs. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2015, Vol. 3, No. 3.
5. **McCreary J.L., Gray P.R.** All-MOS Charge Redistribution Analog-to-Digital Conversion Techniques. Part I. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1975, Vol. 10, No. 6, Pp. 371–379.
6. **Suarez R.E., Gray P.R., Hodges D.A.** All-MOS charge-redistribution analog-to-digital conversion techniques. Part II. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1975, Vol. 10, No. 6, Pp. 379–385.
7. **Ginsburg B.P., Chandrakasan A.P.** 500-MS/s 5-bit ADC in 65-nm CMOS With Split Capacitor Array DAC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, Vol. 42, No. 4, Pp. 739–747.
8. **Son W.L., Majid H.A., Musa R.** High-Resolution 12-Bit Segmented Capacitor DAC in Successive Approximation ADC. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012, Vol. 6, No. 12.
9. **Pei Xiaomin, Zhang Jun.** Design and Optimization on the Interior DAC of SAR ADC. *International Conference on Information Management and Engineering (ICIME 2011)*, Singapore, 2012, Vol. 52.
10. **Cong L., Black W.C.** A New Charge Redistribution D/A and A/D Converter Technique-Pseudo C2C Ladder. *Proc. 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2000.
11. **Baker R.J.** *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*. Wiley-IEEE Press, 2010, 1208 p.
12. **Saberi M., Lotfi R., Mafinezhad K., Wouter A.** Analysis of Power Consumption and Linearity in Capacitive Digital-to-Analog Converters Used in Successive Approximation ADCs. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2011, Vol. 58, No. 8, Pp. 1736–1748.
13. **Lin Y., Zanakopoulos Z., Doris K., Hegt H.** A power-optimized High-Speed and High-Resolution pipeline ADC with a Parallel Sampling First Stage for Broadband Multi-carrier Systems, 2014.
14. **Xicai Yue.** Determining the reliable minimum unit capacitance for the DAC capacitor array of SAR ADCs. *Microelectronics Journal*, 2013, Vol. 44, No. 6, Pp. 473–478.
15. **Zhang W.P., Tong X.** Noise Modeling and Analysis of SAR ADCs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2015, Vol. 23, Iss. 12.

АНДРЯКОВ Юрий Андреевич — младший научный сотрудник «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР». 197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30.
E-mail: andryakov.ya@yandex.ru

ANDRYAKOV Yuri A. Concern CSRI Elektropribor, JSC. 197046, Malaya Posadskaya Str. 30, St. Petersburg, Russia.
E-mail: andryakov.ya@yandex.ru

АНИКИНА Анна Александровна — младший научный сотрудник «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР». 197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30.
E-mail: anna.a.anikina@gmail.com

ANIKINA Anna A. Concern CSRI Elektropribor, JSC. 197046, Malaya Posadskaya Str. 30, St. Petersburg, Russia.
E-mail: anna.a.anikina@gmail.com

БЕЛЯЕВ Яков Валерьевич — начальник НТЦ «Дизайн-центр», «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»,
кандидат технических наук.

197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30.

E-mail: designcenter.spb@mail.ru

BELYAEV Yakov V. Concern CSRI Elektropribor, JSC.

197046, Malaya Posadskaya Str. 30, St. Petersburg, Russia.

E-mail: designcenter.spb@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАТОРОВ В БЕСКОНЕЧНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

R.Yu. Borodulin

USING CONCEPTUAL MODELS OF NUMERICAL ELECTRODYNAMICAL METHODS FOR ANALYZING THE CHARACTERISTICS OF VIBRATORS IN INFINITE DISSIPATIVE MEDIA

Представлены результаты исследования уточненных свойств вибраторов различной электрической длины, помещенных в однородные диссипативные среды (среды с потерями), в зависимости от параметров данных сред. При нахождении распределений тока и фазы тока таких вибраторов впервые использованы современные численные методы электродинамики «полных полей», такие как метод моментов, метод конечных элементов и метод конечных разностей во временной области. Представлены разработанные концептуальные модели вибраторных антенн, погруженных в бесконечные диссипативные среды, пригодные для численного моделирования в известных пакетах программ, либо в собственных алгоритмах. Найденные при помощи данных моделей распределения тока и фазы тока вдоль поверхности вибраторов сравниваются с экспериментально измеренными.

Приведены методики нахождения и результаты расчета площади тока, действующей длины вибраторов, их эффективной площади и входного сопротивления различными методами. Получены практические выводы по свойствам погруженных вибраторов. Проведен анализ корректности использованных численных методов. Результаты, представленные в статье, могут использоваться при нахождении электрических характеристик антенн произвольной формы, в том числе помещенных в диссипативные среды, современными численными методами.

ДИССИПАТИВНЫЕ СРЕДЫ; МЕТОД МОМЕНТОВ; МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ; МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ; КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ; РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА; РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗЫ ТОКА; ПЛОТНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ТОКА; ДЕЙСТВУЮЩАЯ ДЛИНА; ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ.

The article presents the results of a study on the refined properties of vibrators of different electrical lengths placed in a homogeneous dissipative medium (medium with losses), depending on the parameters of these media. Advanced numerical methods of 'full-field' electrodynamics, such as the method of moments, the finite element method and the finite-difference time-domain method were used for the first time for finding the current distribution and the current phase of vibrators. The developed conceptual models of dipole antennas immersed in endless dissipative environment are suitable for numerical simulation in known software packages, or for proprietary algorithms. The current and the current phase distributions along the surface of vibrators found by using these models are compared with the experimentally measured ones.

We have described the techniques and the calculation results for finding the current area, the effective length of vibrators, their effective area and the impedance using a variety of methods. We have reached practical conclusions on the properties of submerged vibrators. We have performed a correct analysis of the numerical methods used. The results presented in the article can be used for finding the electrical characteristics of antennas of arbitrary shape, including those placed in a dissipative medium, by modern numerical methods.

DISSIPATIVE MEDIUM; METHOD OF MOMENTS; FINITE ELEMENT METHOD; FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD; CONCEPTUAL MODEL; CURRENT DISTRIBUTION; PHASE DISTRIBUTION OF CURRENT DENSITY SURFACE CURRENT; EFFECTIVE LENGTH; EFFECTIVE AREA.

Вибраторы, погруженные в диссипативные среды, применяются для связи через воздушное пространство с объектами, погруженными в морскую, речную воду, почву и т. д. В зависимости от параметров среды погружения свойства вибраторов будут сильно отличаться от свойств в свободном пространстве.

На современном этапе, с развитием ЭВМ, широкое распространение получили различные программы и алгоритмы по анализу электромагнитных полей (ЭМП), распространяющихся как в однородных, так и в неоднородных средах. Большинство таких программ основано на численных методах решения задач электродинамики. В соответствии с принятой в [1] классификацией численные методы электродинамики можно разделить на две большие группы: методы нахождения полных полей и высокочастотные методы.

Методы нахождения полных полей основаны на дискретизации расчетной области, в которую помещается антенна либо рассеивающий объект и некоторые окружающие предметы, последующей генерации матричного уравнения $[A][x] = [B]$ и его вычисления $[x] = [A]^{-1}[B]$ в частотной области. Могут быть составлены пространственно-временные схемы во временной области. Современные ЭВМ позволяют применять данные методы с легкостью для объектов, габаритные размеры которых лежат в пределах порядка одной-двух длин волн. К данным методам относятся метод моментов (ММ) (решение интегро-дифференциального уравнения), метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей во временной области (КРВО).

Высокочастотные методы основаны на асимптотических представлениях о распределении тока и наилучшим образом подходят для моделирования объектов, расположенных в однородных средах, размеры

которых составляют большее число длин волн. Для моделирования неоднородных сред они подходят слабо.

Широкое развитие получило моделирование методами полных полей различных антенн, применяющихся в целях связи, телеметрии, разведки или диагностики. При этом антенны, в основном, стараются рассчитывать в однородных средах либо учитывать их самое ближайшее окружение, являющееся неоднородностью, а более удаленное пространство все же считать однородным.

Расчет вибраторных антенн в однородных изотропных диссипативных средах

При расчете тонких проволочных антенн, помещенных в однородные изотропные диссипативные среды, целесообразно применять метод моментов. Если анализируемые антенны имеют цилиндрическую форму, и их радиус много меньше длины самого вибратора и длины волны, то в данном методе можно воспользоваться тонкопроволочным приближением [2]. Безграничность среды, в которую помещается антенна, учитывается автоматически. В случае использования МКЭ и КРВО, для имитации безграничности пространства имеет смысл воспользоваться математическим аппаратом моделей поглощающих слоев (ПС) или Perfectly Matched Layers (PML) [3]. Ограничение расчетной области ПС дает эффект отсутствия отражений от границ расчетной области падающих на них волн, что равноценно выделению некоторой области бесконечного пространства со свободно распространяющимися в нем электромагнитными волнами (рис. 1).

С целью проверки влияния удаленности ПС от источника излучения помимо конструктивных параметров вибратора имеет смысл рассмотреть ряд дополнительных параметров модели. Данными параметрами

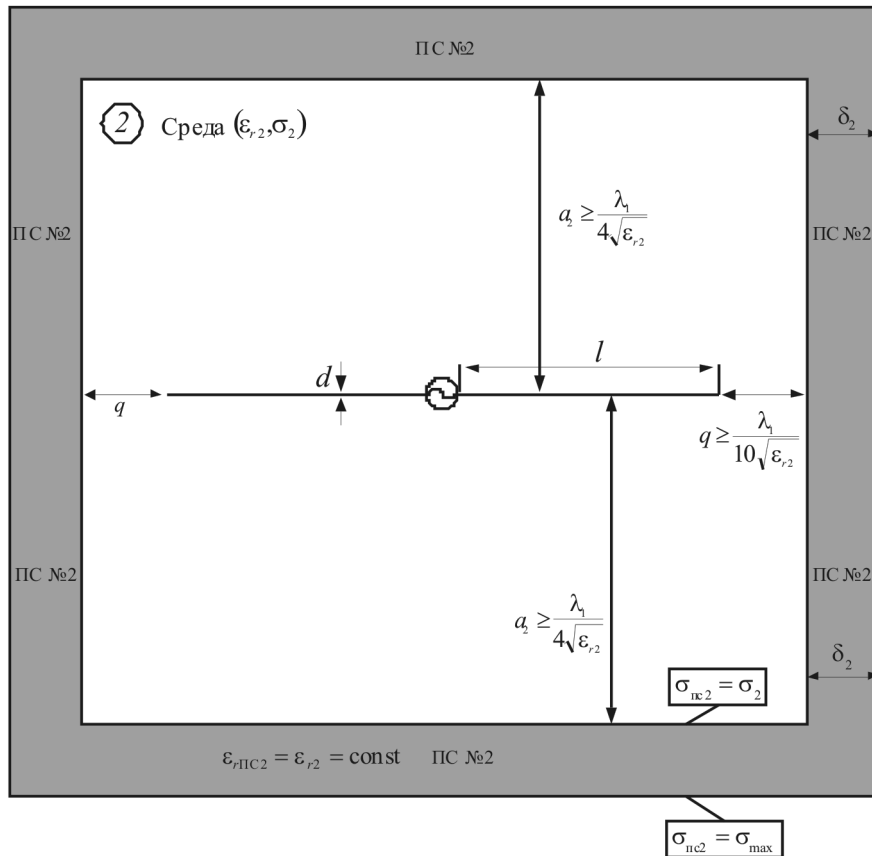


Рис. 1. Функциональная схема концептуальной МКЭ- и КРВО-модели вибраторной антенны, погруженной в бесконечную диссипативную среду

являются расстояние от торцов вибратора до стенок расчетной области с ПС (параметр q) и расстояние от образующей цилиндра, аппроксимирующей поверхность вибратора в направлении нормали к данной поверхности также до стенок расчетной области с ПС (параметр a_2). Обозначение «ПС № 2» означает ограничение поглощающими слоями толщины δ_2 диссипативной среды с параметрами $(\epsilon_{r2}, \sigma_2)$. Параметры концептуальных МКЭ- и КРВО-моделей q и a_2 варьировались нами в некоторых пределах: $q \approx (0,09, \dots, 0,25)\Lambda$, $a_2 \approx (0,16, \dots, 0,25)\Lambda$, где Λ — длина волны в диссипативной среде с учетом укорочения. Их изменение в данных пределах практически не сказалось на получаемых результатах, поэтому нами окончательно были выбраны минимальные, с которыми можно экономить ресурс ЭВМ.

В середине XX в. американским ученым Р. Кингом была разработана теория антенн,

помещенных в бесконечные диссипативные среды [4]. Помимо расчетов Кингом был проведен ряд экспериментов с моделями вибраторов в средах с потерями [5]. Экспериментальным путем были получены зависимости распределения тока погруженного в диссипативную среду с различными параметрами симметричного вибратора различной длины. Ограничением теории Кинга было отсутствие учета электрически близко расположенной границы раздела двух полубесконечных сред: все расчеты и измерения проводились в изотропных однородных диссипативных средах.

Была произведена оценка корректности работы созданных нами алгоритмов расчета антенн в диссипативных средах, основанных на методах полных полей. В качестве эталона были взяты экспериментальные кривые Кинга. Расчеты полей производились методами моментов, мето-

дом конечных элементов в пакете ANSYS HFSS и методом конечных разностей во временной области. Целью анализа методом моментов стало то, что данный метод напрямую предназначен для нахождения распределения тока вдоль цилиндрических проводников антенны. При этом среда, окружающая исследуемую модель, автоматически принимается безграничной. Интересна степень соответствия результатов, полученных ММ, в сравнении с сеточными методами, работающими с конечными объемами (МКЭ и КРВО), и, конечно, с экспериментом.

В качестве параметров моделей были выбраны реальные, использованные Кингом: частота генератора 114 МГц, электрические длины плеч антенны $\beta l = \pi/2$ и $\beta l = \pi$. Следуя работе Кинга, в моделях использовались первый и пятый из рассмотренных им типа сред: первый – с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r2} = 78$ и тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = \sigma_2 / \omega\epsilon_{r2}\epsilon_0 = 0,036$, второй – с $\epsilon_{r2} = 69$ и $\text{tg}\delta = \sigma_2 / \omega\epsilon_{r2}\epsilon_0 = 8,8$, т. е. по классификации Кинга слабосоленая и соленая среды. Таким образом, моделирование расчетной области было произведено со следующими

параметрами заполняющей ее изотропной среды: $\epsilon_{r2} = 78$, $\sigma_2 = 0,01784$ См/м (слабосоленая) и $\epsilon_{r2} = 69$, $\sigma_2 = 3,8456$ См/м (соленая).

В результате расчетов были получены графики распределения амплитуды тока, отнесенной к возбуждающему антенну напряжению в зависимости от безразмерной длины антенны βz , где β – коэффициент фазы в среде с потерями (рис. 2), z – текущая координата, отсчитываемая вдоль плеча вибратора. Амплитуды и фазы токов, полученные Кингом, соответствуют распределениям вдоль одного из плеч симметричного вибратора (диполя). В наших алгоритмах также были найдены распределения, соответствующие одному из плеч симметричного вибратора.

Методики нахождения распределения тока вдоль вибраторных антенн для МКЭ и КРВО заключаются в формировании замкнутых контуров интегрирования касательных составляющих магнитного поля, охватывающих поверхность вибраторов. Более подробно данные методики будут рассмотрены ниже.

Наилучшее приближение к экспериментально измеренному распределению

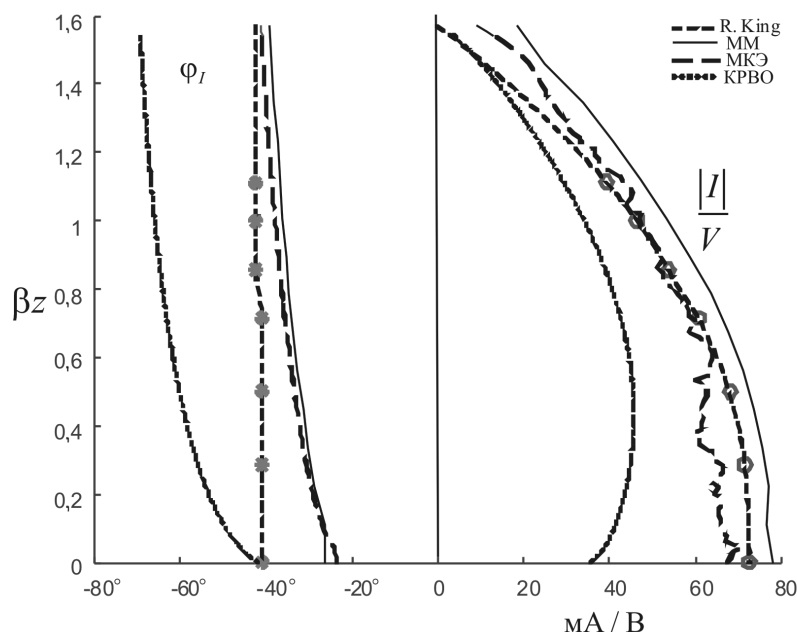


Рис. 2. Распределение нормированного к напряжению тока и фазы тока вибратора длины $\pi/2$ в слабосоленой среде

тока для $\pi/2$ вибратора в слабосоленой среде показали ММ и МКЭ. Метод моментов является численным методом. Нами использовался метод Галеркина с кусочно-синусоидальным базисом, который на этапе вывода уравнений учитывает цилиндрическую форму вибратора (см. рис. 2). Худший результат показал метод КРВО, т. к. ему присуща грубая «кубическая» аппроксимация формы вибратора. Промежуточную точность показал МКЭ, поскольку лучше, чем КРВО, но хуже чем ММ аппроксимирует цилиндрическую поверхность антенны.

Помимо распределения тока были рассчитаны распределения фазы тока относительно фазы источника возбуждения, также измеренные Кингом (см. рис. 2). Все используемые численные методы имеют различные способы построения модели источника возбуждения. Так, в методе моментов нами использована модель кольцевого магнитного тока, имитирующая подключение коаксиальной линии передачи [2], в МКЭ — тонкая узкая «пластина» с заданным на ней напряжением, в КРВО — продольная составляющая электрического поля, изменяющаяся во времени. Метод моментов

наилучшим образом передает поведение фазы тока вдоль плеча вибратора. Метод конечных элементов показывает схожий с ММ результат. Метод КРВО дал сдвинутый относительно эталона результат, в итоге не имеющий принципиальной разницы в сравнении с остальными.

Увеличение электрической длины антенны до $\beta l = \pi$ показало несколько иную картину распределений (рис. 3).

Все численные методы показали примерно одинаковый по точности результат. Распределение фазы тока, рассчитанное ММ и МКЭ (в реализации ANSYS HFSS), оказалось самым точным.

При замене среды, в которую помещался вибратор, на соленую, распределения тока изменили свою форму существенным образом (рис. 4). Наилучшее приближение к измеренному для вибратора с электрической длиной $\beta l = \pi/2$ показал КРВО, поскольку сильное затухание токов скомпенсировало разницу за счет грубой аппроксимации. Распределение тока, полученное МКЭ, немного уступает ММ, но в принципе дает примерно одинаковый результат.

Распределение фаз токов для КРВО становятся очень близкими к измеренно-

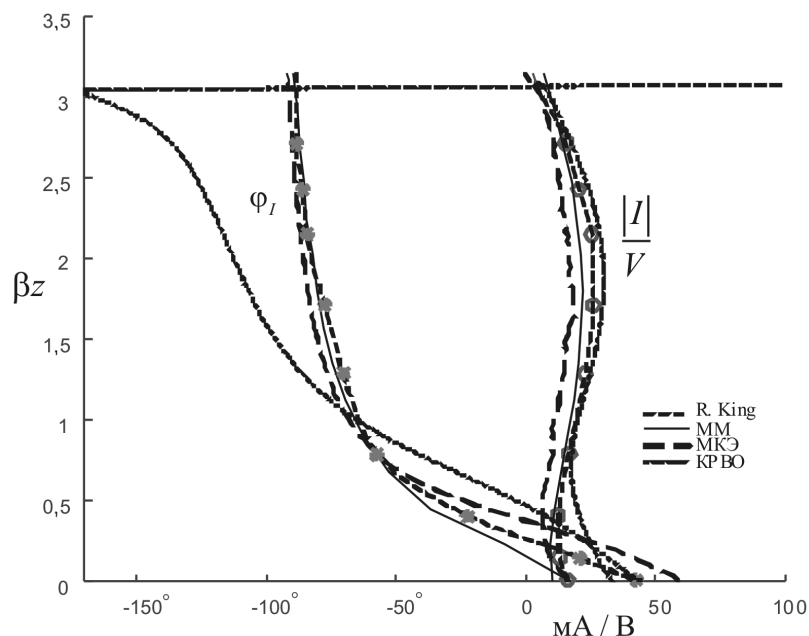


Рис. 3. Распределение нормированного к напряжению тока и фазы тока вибратора длины π в слабосоленой среде

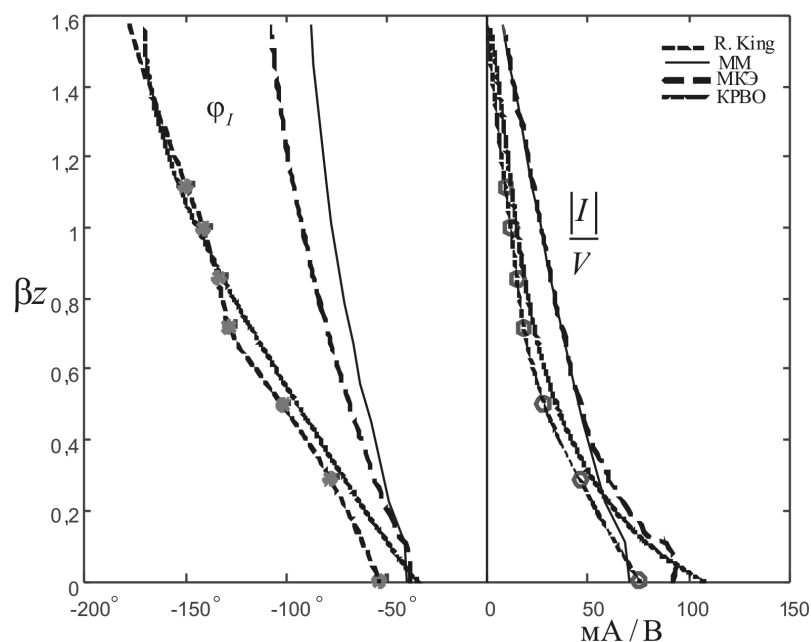


Рис. 4. Распределение нормированного к напряжению тока и фазы тока вибратора длины $\pi/2$ в соленой среде

му также в силу высокого затухания тока (см. рис. 4). Отличие фаз для ММ и МКЭ объясняется отличным от эталона радиусом провода (в силу ограничений метода взят

примерно в два раза меньше), поскольку с большим радиусом в ММ нарушается тонкопроволочная аппроксимация. Модель, рассчитанная МКЭ, специально была по-

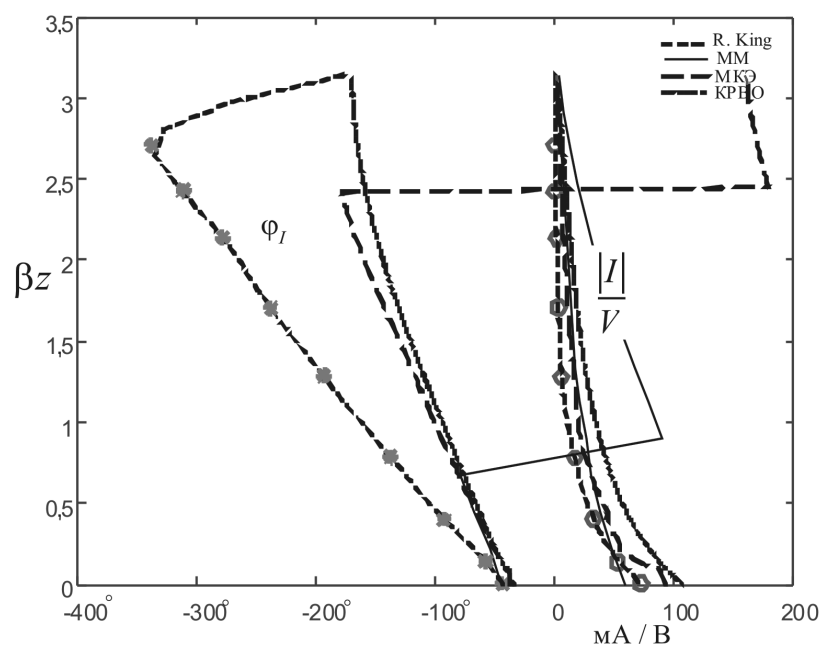


Рис. 5. Распределение нормированного к напряжению тока и фазы тока вибратора длины π в соленой среде

строена с тем же радиусом, что и ММ для проверки соответствия методов.

Наконец, при увеличении электрической длины вибратора до $\beta z = \pi$ в соленой среде все методы опять дали примерно одинаковый по точности результат (рис. 5). При сравнении распределения фазы тока с экспериментальным наилучшее приближение имеет кривая, полученная КРВО (см. рис. 5). Одинаковый результат показывают ММ и МКЭ. Скачкообразное изменение фаз, полученное численными методами, говорит о перехлесте токов. Кингом данные перехлесты не показаны, хотя практика говорит о том, что они должны быть.

Отдельно необходимо остановиться на способе расчета распределения токов вдоль плеч вибраторов, специально разработанном нами для МКЭ и КРВО. Известно, что распределение токов на проводящих поверхностях антенны может быть довольно сложным: токи в отдельных частях антенны могут быть как синфазными, так и противофазными. Это влияет на результаты расчетов большинства параметров антенн.

Предлагаемый вариант заключается в нахождении распределения токов $I(y)$ вдоль поверхности проволоочной антенны при помощи моделирования замкнутых контуров интегрирования, касающихся поверхности вибратора (рис. 6).

Рассмотрим процесс нахождения тока на примере МКЭ. Контур интегрирования (для антенн цилиндрической формы они должны быть в виде колец) являются замкнутыми, поэтому для нахождения тока в любом из сечений вибратора необходимо брать криволинейный интеграл по замкнутому контуру от касательной к нему составляющей вектора магнитного поля $\mathbf{H}_\tau$:

$$I(y) = \left| \oint_L \mathbf{H}_\tau dL \right|, \quad (1)$$

где L – внешний контур поперечного сечения вибратора.

Нахождение интеграла вида (2) всегда подразумевает знание направления обхода контура интегрирования (по часовой стрелке либо против часовой стрелки). В процессе самого интегрирования все контуры должны иметь одинаковое направление обхода, тогда при нахождении площади тока синфазные токи будут складываться, а противофазные – вычитаться, т. е. корректно уменьшать действующую длину вибратора.

Для МКЭ особенностью является необходимость моделирования замкнутой линии контура и нахождения интегральной суммы составляющих магнитного поля, касательных к ней, в то время как в КРВО используется разностная аппроксимация обхода контура, основанная на сумме разностей величин составляющих магнитного поля,

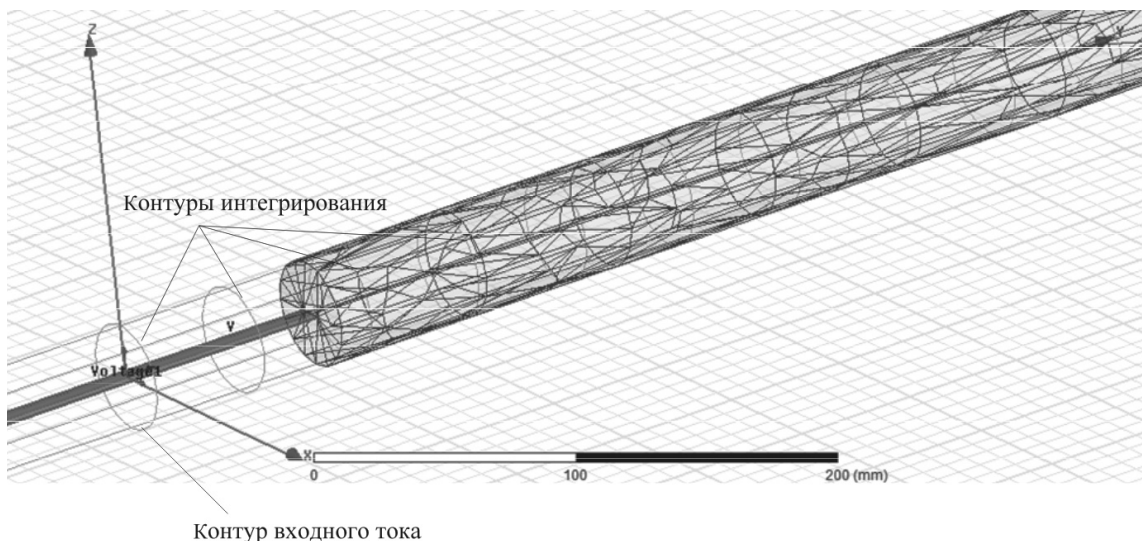


Рис. 6. Приближенный способ нахождения распределения тока вибраторной антенны МКЭ

лежащих в плоскости, перпендикулярной оси вибратора:

$$I_n(y) = (H_{x1}(n_z + 1) - H_{x2}(n_z - 1))dz + (H_{z1}(n_x + 1) - H_{z2}(n_x - 1))dx, \quad (2)$$

где n — порядковый номер ячейки с электрическими параметрами металла вибратора вдоль его оси (вдоль y); n_z , n_x — номера тех же ячеек вдоль осей z и x , соответственно; $H_{x1, x2, z1, z2}$ — составляющие магнитного поля, касательные к контуру интегрирования.

Результаты, полученные МКЭ и КРВО, несмотря на принципиальную разницу в методах, очень схожи, что говорит об их корректности. Однако для увеличения точности может понадобиться необходимость достаточно подробной дискретизации поверхностей плеч вибраторов, поскольку точки контура, в которых вычисляется магнитное поле, желательно выбирать принадлежащими различным конечным элементам (для МКЭ) либо различным КРВО-ячейкам (для КРВО). Если несколько точек контура попадает в одну и ту же ячейку, то возникает погрешность интерполяции.

Результаты, полученные методами полных полей по распределению амплитуд и фаз токов, показывают хорошее приближение к результатам, полученным экспериментальным путем. Поскольку ММ является численным методом, он в большинстве случаев показывает наилучшее приближение. Исключением не является моделирование электрически длинных вибраторов в соленых средах, где МКЭ и КРВО также дают хорошее соответствие полученных распределений между собой и экспериментальными данными. Результаты моделирования говорят о корректности работы алгоритмов и программ, справедливости использования поглощающих слоев и предлагаемого способа нахождения распределения тока.

Однако для практических расчетов электрических характеристик антенн необходимо учитывать не только распределение амплитуд и фаз токов, но и величину тока в области питания антенны, влияющего на многие параметры, такие, например,

как действующая длина (l_d) и эффективная площадь ($A_{эфф}$). Входной ток, в отличие от тока, текущего вдоль проводников, значительно зависит от поперечных размеров плеч (радиуса) вибратора. Кроме того, при нахождении величины l_d необходимо производить интегрирование распределенного по поверхности вибратора тока по длине плеча, т. е. находить площадь тока.

Под действующей длиной принимается длина вибратора с равномерным распределением тока, равного току у зажимов антенны, который создает такое же поле, как и действительная антенна [6].

Таким образом, при нахождении величины действующей длины, в соответствии с теоремой взаимности, полученное распределение тока интегрируется по длине вибратора:

$$l_d = \frac{1}{I_A} \int_{-l}^l I(y) dy, \quad (3)$$

где I_A — ток в области возбуждения.

Способ нахождения площади тока, распределенного по излучающей металлической поверхности антенн произвольной формы

Для нахождения действующей длины l_d распределение тока вдоль плеча вибраторной антенны, найденное в соответствии с рекомендациями, указанными выше, можно проинтегрировать вдоль него любым методом численного интегрирования, например, методом трапеций. Однако как же быть, если форма антенны отлична от цилиндрической? Для таких антенн формирование поперечных контуров интегрирования, рассмотренных выше, становится крайне трудоемкой, не гарантирующей точности результата задачей.

Предлагается применить математический аппарат вычисления поверхностного тока, справедливый для антенн, излучающая поверхность которых выполнена из металла.

Для методов МКЭ и КРВО данная величина может быть найдена в каждой ячейке, граница которой лежит на металлической поверхности вибратора, т. е. распределение

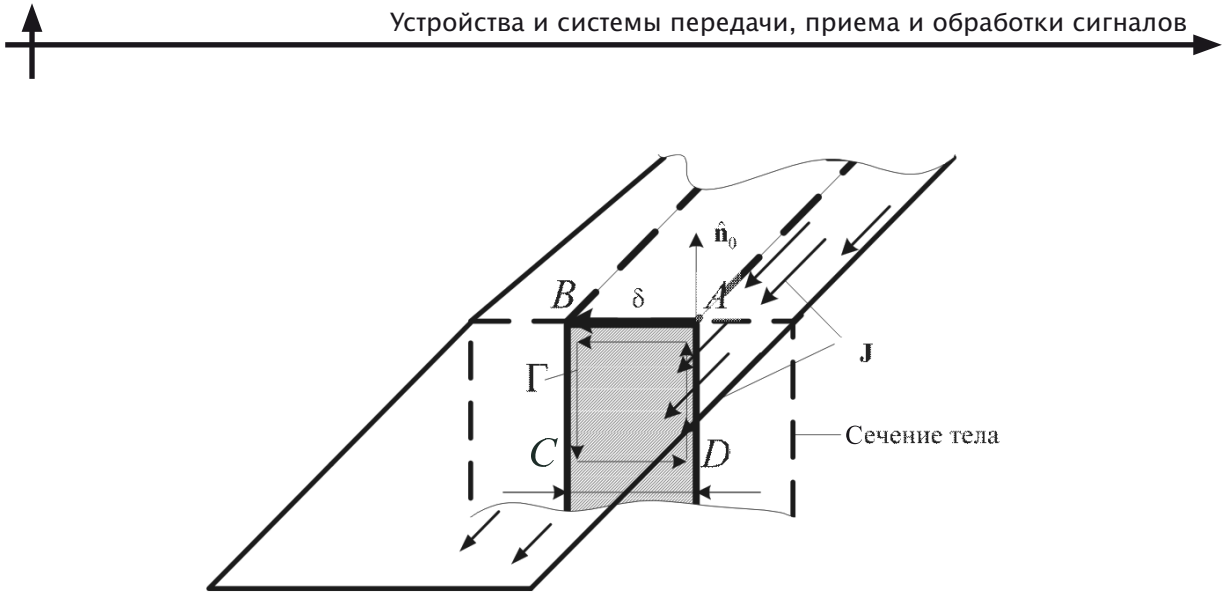


Рис. 7. Выделенный «брусоч» с током для объема с произвольными параметрами

поверхностного тока может быть найдено тем точнее, чем точнее аппроксимируется поверхность антенны. В ANSYS HFSS автоматически находится распределение плотности поверхностного тока при соответствующих манипуляциях в программе.

Рассмотрим процедуру нахождения поверхностного тока. Как известно, поверхностный ток на хорошо проводящей плоскости численно равен модулю проекции вектора $\mathbf{H}$ на эту плоскость и направлен перпендикулярно ей [7]. Для примера рассмотрим некий объем с выделенным на нем «брусоч» с протекающим в нем током (рис. 7).

Ток, протекающий через выделенный «брусоч», равен криволинейному интегралу по контуру Γ , который может проходить через внешнюю границу «бруска» $ABCD$, от вектора магнитного поля, касательного к данной границе. В соответствии со свойством аддитивности криволинейных интегралов интеграл по замкнутому контуру в нашем случае можно представить в виде суммы четырех интегралов:

$$\mathbf{I} = \oint_{ABCD} \mathbf{H} d\Gamma = \int_{AB} \mathbf{H}_\tau d\Gamma + \int_{BC} \mathbf{H}_\tau d\Gamma + \int_{CD} \mathbf{H}_\tau d\Gamma + \int_{DA} \mathbf{H}_\tau d\Gamma. \quad (4)$$

В случае идеального проводника «брусоч» частично окажется внутри металла и, естественно, составляющие вектора $\mathbf{H}$ к

участкам BC , CD , DA контура Γ будут равны нулю, кроме участка AB . Внутри металла электромагнитных полей нет (кроме области, ограниченной скин-слоем), поэтому для проводника будет справедливо равенство:

$$\mathbf{I} = \oint_{ABCD} \mathbf{H} d\Gamma = \int_{AB} \mathbf{H}_\tau d\Gamma. \quad (5)$$

Тогда искомый ток $\mathbf{I}$ – ток поверхностный с абсолютной величиной плотности

$$|\mathbf{J}_s| = \left| \frac{\mathbf{I}}{\delta} \right| = \left| \frac{\int_{AB} \mathbf{H}_\tau d\Gamma}{\delta} \right| = |\mathbf{H}_\tau|. \quad (6)$$

Альтернативное выражение для нахождения вектора плотности поверхностного тока, учитывающее его направление, имеет вид:

$$\mathbf{J}_s = [\hat{\mathbf{n}}_0, \mathbf{H}], \quad (7)$$

где $\hat{\mathbf{n}}_0$ – нормаль к данной поверхности (см. рис. 7).

Учитывая, что любой контур можно представить набором отрезков (рис. 8) длиной $\delta \rightarrow 0$, общая длина окружности (контур интегрирования) L равна сумме данных отрезков:

$$L = \sum_{i=1}^N \delta_i \approx \left| \oint_L dL \right|, \quad (8)$$

где N – число хорд, формирующих контур. Поскольку для идеального проводника

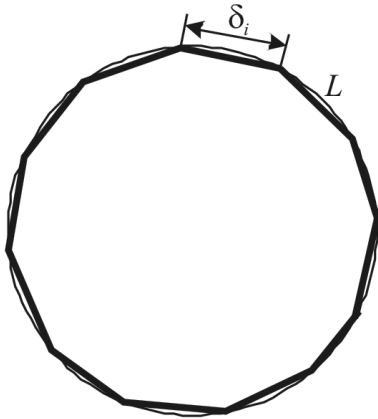


Рис. 8. К задаче нахождения длины контура интегрирования

справедливо равенство

$$|\mathbf{H}_\tau| = |\hat{\mathbf{n}}_0, \mathbf{H}| = |\mathbf{J}_s|, \quad (9)$$

на основании выражений (8) и (9) будет справедливо соотношение

$$I(y) = \left| \oint_L \mathbf{H}_\tau dL \right| \approx \left| \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{si} \delta_i \right|. \quad (10)$$

Площадь поверхности тонкого цилиндрического проводника без торцевых поверхностей с учетом выражения (8) ($dL \approx \delta$) можно представить как

$$\int_S dS \approx \int_{-l}^l \left| \oint_L dL \right| dl \approx \int_{-l}^l \left(\sum_{i=1}^N \delta_i \right) dl. \quad (11)$$

Теперь интеграл вида (3) будет примерно соответствовать выражению:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{I_A} \int_{-l}^l I(y) dy = \\ &= \frac{1}{I_A} \int_{-l}^l \oint_L \mathbf{H}_\tau dL dy \approx \frac{1}{I_A} \int_S \mathbf{J}_s dS. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, оперирование плотностью поверхностного тока более удобно, нежели нахождение криволинейных интегралов по большому числу замкнутых контуров от касательной составляющей вектора магнитного поля, поскольку для современных численных методов, таких как МКЭ и КРВО, любая поверхность все равно аппроксимируется либо треугольниками (как в МКЭ), либо прямоугольниками

(как в КРВО). Поверхности данных фигур являются плоскими, поэтому в пределах единичного граничного треугольника или прямоугольника рассчитанная плотность поверхностного тока будет практически постоянной, а интегрирование по общей поверхности S заменяется простым суммированием всех поверхностных токов. Если же формировать замкнутые контуры, то некоторые поверхностные ячейки можно случайно пропустить, что приведет к неточностям бóльшим, чем дают погрешности в нахождении площади тока, возникающие за счет учета торцов плеч.

Как известно, плотности поверхностных токов являются комплексными векторными величинами, поэтому любое суммирование автоматически приведет к вычитанию противофазных токов, что приведет к правильному снижению действующей длины анализируемой антенны, что в свою очередь приведет к корректному нахождению других характеристик антенн, зависящих от нее, например, эффективной площади антенны $A_{эф}$.

Анализ точности расчетов параметров антенн, расположенных в диссипативных средах, методами полных полей

Кингом помимо распределений токов были измерены и входные проводимости $Y_0 = G_0 + iB_0$ вибраторов электрической длины $\pi/2$ [5]. Поскольку проводимость является величиной, обратной входному сопротивлению, а распределения токов были соотнесены к величине возбуждающего напряжения, величину тока на входе антенны можно принять равной величине проводимости. Это следует из следующих соотношений:

$$Z_A = 1 / Y_0 = U / I_A, \quad (13)$$

где Z_A — входное сопротивление вибратора.

Если принять величину напряжения $U = 1$ В, то входная проводимость будет равна по амплитуде и фазе входному току.

Входные проводимости, полученные Кингом, являются проводимостями несимметричного варианта антенн, поэтому вычислять будем параметры несимметричных

антенн. Для этого все токи симметричной антенны (в том числе и на входе) в соответствии с методом зеркальных изображений увеличиваются в два раза.

Радиус вибратора, использованного Кингом в макете, составляет скорее всего не $0,01\lambda_0$, как указано в работе, а $0,001\lambda_0$, где λ_0 — длина волны в свободном пространстве, иначе антенна получится очень толстой.

Модели, реализованные ММ, являются симметричными. Для них была произведена коррекция токов. Модели, реализованные МКЭ и КРВО, изначально были построены и в симметричном, и в несимметричном вариантах, поэтому для использованных алгоритмов коррекция токов не потребовалась.

Следуя работе Кинга, можно наблюдать резонансное поведение входных проводимостей, уменьшающееся с увеличением проводимости среды. Минимум активной составляющей входной проводимости до-

стигается при достижении электрической длины вибраторов величины π , что говорит о явлении параллельного резонанса.

Абсолютная величина эффективной площади вибраторов чувствительна к величине входного сопротивления. Нами она была вычислена согласно выражению:

$$|A_{\text{эфф}}| = \frac{30\pi |I_d|^2}{R_A}, \quad (14)$$

где R_A — действительная часть входного сопротивления.

Распределения амплитуд и фаз токов, полученные Кингом, являются неполными (см. рис. 2–5), поэтому данные зависимости были достроены нами квадратичным сплайном до полной длины вибраторов, в предположении равенства нулю тока на торце. Численное интегрирование дискретных величин токов, найденных при помощи замкнутых контуров, было реализовано методом Симпсона. Площади токов, вычисляемые через плотности поверхностных

Результаты расчета параметров несимметричных вибраторов в изотропных диссипативных средах

Длина вибраторов		$\beta l = \pi/2$ ($l = 0,0745$ м)	$\beta l = \pi$ ($l = 0,1488$ м)	$\beta l = \pi/2$ ($l = 0,0357$ м)	$\beta l = \pi$ ($l = 0,0714$ м)
Метод анализа		$\varepsilon_{r2} = 78, \quad \sigma_2 / \omega \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 = 0,036$		$\varepsilon_{r2} = 69, \quad \sigma_2 / \omega \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 = 8,8$	
Эксперимент ($a = 2,63$ мм)	Z_A , Ом	$12 + 4i$	—	$6,47 + 4,11i$	—
	$a = 2,63$ мм				
	$ I_d $, м	0,0926	—	0,0106	—
Метод моментов ($a = 1$ мм)	$ A_{\text{эфф}} $, м ²	0,0674	—	0,0016	—
	Z_A , Ом	$6,37 + 2,32i$	$22,96 - 31,62i$	$3,88 + 1,3i$	$4,537 + 1,75i$
	$ I_d $, м	0,055	0,1428	0,01	0,011
МКЭ ($a = 1$ мм)	$ A_{\text{эфф}} $, м ²	0,0453	0,0836	0,0025	0,0026
	Z_A , Ом	$7,43 + 4,78i$	$19,97 + 28,25i$	$4,36 + 3,46i$	$4,387 + 3,3i$
	$ I_d $, м	0,056	0,1096	0,0146	0,012
МКЭ ($a = 2,63$ мм)	$ A_{\text{эфф}} $, м ²	0,039	0,0567	0,0046	0,0031
	Z_A , Ом	$7,78 + 3,67i$	$9,4286 - 13,65i$	$2,67 + 4,6i$	$2,766 + 4,44i$
	$ I_d $, м	0,056 / 0,055	0,0824 / 0,088	0,012 / 0,011	0,012 / 0,011
КРВО ($a = 1$ мм)	$ A_{\text{эфф}} $, м ²	0,039 / 0,036	0,0679 / 0,077	0,005 / 0,044	0,005 / 0,042
	Z_A , Ом	$12,08 + 10,93i$	$12,59 - 12,22i$	$4,25 + 3,22i$	$4,45 + 3,23i$
	$ I_d $, м	0,0884	0,0766	0,014	0,013
КРВО ($a = 1$ мм)	$ A_{\text{эфф}} $, м ²	0,061	0,0439	0,0043	0,0037

токов, для сравнения с первым способом, были получены в программе ANSYS HFSS при помощи утилиты field calculator. Это было сделано путем разложения комплексных векторных плотностей на скалярные составляющие по осям координат отдельно для действительной и мнимой частей комплексной амплитуды, их интегрирования по металлической поверхности вибратора, нахождения абсолютной величины, а после — общей длины векторов.

Результаты расчетов сведены в таблицу. Для вибраторов с радиусом $a = 2,63$ мм, рассчитанных МКЭ, через дробь показаны результаты, полученные при расчете действующей длины через интеграл от плотности поверхностного тока.

С помощью полученных результатов выяснилось, что рассчитанная нами, исходя из измеренного Кингом распределения тока и входной проводимости, действующая длина четвертьволнового вибратора в диссипативной слабосоленой изотропной среде, несколько превышает действительную длину вибратора. Данный результат противоречит физическим представлениям, поскольку имеются хоть и слабые, но все-таки потери в рассматриваемой среде, приводящие к затуханию тока. Данный факт, скорее всего, говорит о неточности, допущенной Кингом в ходе измерения величины входной проводимости. Вероятно, она получилась заниженной, что привело к завышению полученной нами из нее величины входного сопротивления. В пользу данного утверждения говорит тот факт, что результаты, полученные методом моментов и методом конечных элементов, практически совпали, показав в два раза меньшую величину входного сопротивления. Метод КРВО показал схожий с экспериментом результат в силу грубости полученной модели (интегрирование проводилось с малым числом токов, т. к. действительная длина антенны весьма мала, а среда имеет потери).

Данных измерений входной проводимости, при увеличении электрической длины до величины π , в работе Кинга нет (приводятся графики входных проводимостей для других параметров слабосоленых сред, нами не рассматриваемых), поэтому при-

ходится опираться только на численные расчеты. Поскольку данная электрическая длина соответствует величине π , моделируется область параллельного резонанса. Из-за малых потерь величина входного сопротивления испытывает серьезные колебания, поэтому результаты, полученные численными методами, будут очень зависеть от используемой модели возбуждения, наличия паразитных торцевых емкостей и т. д. Это видно из результатов, полученных МКЭ: при увеличении радиуса действительная часть входного сопротивления вполне закономерно снизилась, в то время как реактивная составляющая поменяла знак, что говорит о значительном укорочении вибратора. Результаты, полученные КРВО и ММ, подтверждают данную догадку. Величины действующей длины и эффективной площади, полученные МКЭ и КРВО, получились близкими. Метод моментов, исходя из сравнения с результатами для вибратора длины $\pi/2$, дал явно завышенное значение действующей длины, что привело к завышению величины эффективной площади.

В соленой среде наиболее близкие результаты по входному сопротивлению дали МКЭ и КРВО. Метод моментов имеет несколько заниженные значения величины Z_A . Это привело к тому, что, несмотря на самое близкое к экспериментальному значение действующей длины, эффективная площадь оказалась завышенной. Сказывается малая величина действительной длины моделируемых вибраторов и, как следствие, завышение значений входного тока за счет искажений тонкопроволочного приближения. Действующие длины, полученные МКЭ и КРВО, наоборот, оказались завышены, а входные сопротивления занижены. Это произошло в силу того, что среда имеет большие потери, приводящие к малости второго порядка полученных величин, что сказалось на завышении итоговых значений эффективной площади. Скорее всего, это произошло (так же как и в ММ) за счет малой величины действующей длины вибратора.

При увеличении электрической длины вибратора до величины π в соленых средах данных измерений входной проводимости



в работе Кинга нет, однако все численные модели показали примерно одинаковый результат. Это говорит о положительном влиянии увеличения действующей длины на точность численных расчетов, поскольку увеличивается точность численного интегрирования.

Таким образом, численные методы показали хорошие результаты и в слабосоленых, и в соленых средах. В среде с малыми потерями хороший результат достигнут для вибратора электрической длины $\pi/2$. В среде с сильными потерями хороший результат достигнут для вибратора электрической длины π . Это подтверждает тот факт, что величина потерь в среде значительно влияет на точность моделирования. Если потери слабые, на первое место выходит точность расчета входного сопротивления, для больших потерь — точность численного интегрирования тока. В целом методы полных полей, в совокупности с результатами, полученными по распределениям амплитуд и фаз токов, показывают весьма точный результат для любых сред, зависящий от многих факторов. Это подтверждается сравнением с экспериментом. Тем не менее, на первое место все же можно поставить точность аппроксимации излучающей поверхности и подробность ее дискретизации численными методами. Точность расчетов методом моментов зависит от отношения радиуса моделируемого вибратора к его длине из-за ограничений тонкопроволочного приближения.

В качестве общих практических выводов можно обозначить следующее.

Величина входного сопротивления зависит от радиуса вибратора тем сильнее, чем выше проводимость среды. Для слабосоленых сред влияние выше.

Увеличение проводимости среды оказывает понижающее воздействие на входное сопротивление, при этом разница в эффективных площадях для сред с различной

проводимостью может достигать одного порядка. Высокая проводимость сред негативно отражается на эффективной площади антенн, делая ее очень малой.

Увеличение электрической длины вибраторов в слабосоленых средах приводит к росту эффективной площади. В соленых средах увеличение длины, к сожалению, такого эффекта не дает, поскольку имеется сильное затухание токов вдоль плеч.

Эффект от увеличения радиуса (вывод сделан в соответствии с результатами для эффективной площади, полученными МКЭ) достигается только для длинных антенн в соленых средах. Это вызвано, скорее всего, влиянием затухания. Для повышения эффективности антенн в произвольной диссипативной среде необходимо искать компромисс между электрической длиной антенны и ее поперечными размерами.

Входное сопротивление тонких вибраторов, так же как и в свободном пространстве, имеет резонансный характер, уменьшающийся с увеличением проводимости среды. Это накладывает возможное ограничение на полосу рабочих частот таких антенн.

Для практических целей электрические длины тонких вибраторов необходимо выбирать меньшими половины длины волны (с учетом укорочения в среде), что диктуется резкими изменениями реактивной составляющей входного сопротивления за счет наличия параллельного резонанса. Это приводит к тому, что для перекрытия широкого диапазона частот необходимо использовать несколько типоразмеров таких антенн.

Точность совпадения результатов, полученных численными методами, с экспериментом тем выше, чем выше проводимость моделируемой среды. Это вызвано уменьшением влияния резонансных явлений, поэтому методы полных полей будут пригодны для анализа с высокой точностью антенн большого поперечного размера. Среда могут иметь широкий разброс в проводимостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stutzman W.L., Thiele G.A. Antenna Theory and Design. 3rd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

2. Бородулин Р.Ю. Численные методы электродинамики: Моногр. СПб.: ВАС, 2016. 180 с.

3. **Berenger J.P.** A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // *J. Comp. Phys.* 1994. Vol. 114. No. 2. Pp. 185–200.

4. **King R.W.P.** Dipoles in Dissipative Media // *Cruft Laboratory Scientific Report 336*. Harward University, 1961.

5. **Iizuka K., King R.W.P.** An Experimental Study of the Properties of Antennas Immersed in

Conducting Media // *Cruft Laboratory Scientific Report 2*. Harward University, 1961.

6. **Гавеля Н.П., Истрашкин А.Д., Муравьев Ю.К., Серков В.П.** Антенны. Ч. 1. Л.: ВКАС, 1963.

7. **Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д.** Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2002.

REFERENCES

1. **Stutzman W.L., Thiele G.A.** *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. N.Y.: John Willey & Sons, Inc, 2012.

2. **Borodulin R.Yu.** *Chislennyye metody elektrodinamiki [Numerical methods of electrodynamics: monograph.]*. St Petersburg: VAS, 2016, 180 p. (rus)

3. **Berenger J.P.** A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comp. Phys.*, 1994, Vol. 114, No. 2, Pp. 185–200.

4. **King R.W.P.** Dipoles in Dissipative Media, *Cruft Laboratory Scientific Report 336*, Harward

University, 1961.

5. **Iizuka K., King R.W.P.** An Experimental Study of the Properties of Antennas Immersed in Conducting Media, *Cruft Laboratory Scientific Report 2*, Harward University, 1961.

6. **Gavelya N.P., Istrashkin A.D., Muravyev Yu.K., Serkov V.P.** *Antenny, Chast 1 [Antennas, Part I]*. Leningrad: VKAS, 1963. (rus)

7. **Pimenov Yu.V., Volman V.I., Muravtsov A.D.** *Tekhnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodynamics]*. Moscow: Radio i svyaz Publ., 2002. (rus)

БОРОДУЛИН Роман Юрьевич — докторант Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, кандидат технических наук.

194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

E-mail: borodulroman@yandex.ru

BORODULIN Roman Yu. *Military academy of communications.*

194064, Tikhoretsky Str. 3, St. Petersburg, Russia.

E-mail: borodulroman@yandex.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.252.4

УДК 681.51

С.Ф. Бурдаков, Т.А. Байдина, О.Б. Шагниец

УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫМ СОСТОЯНИЕМ РОБОТА ПРИ СИЛОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕОПРЕДЕЛЁННОГО ПРОФИЛЯ

S.F. Burdakov, T.A. Baydina, O.B. Shagniev

CONTROL OF VIBRATIONAL STATE OF A ROBOT INTERACTING WITH A ROUGH FREE-FORMED SURFACE

Рассмотрена задача позиционно-силового управления движением робота с силовым датчиком обратной связи в режиме контактного взаимодействия с поверхностью неопределенного профиля. Считается, что поверхность может быть шероховатой, а робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней. В этом случае шероховатость может стать причиной возбуждения колебаний робота, близких к резонансным. В настоящей статье показано, при каких условиях этот эффект возможен и как при этом управлять вибрационным состоянием робота. Проведен сравнительный анализ вибрационного состояния робота при жестком и активном креплении силового сенсора к руке робота. Показано, что при активном креплении силового сенсора можно существенно снизить уровень вибраций руки робота. Исследованы возможности дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра, установленного на руке робота, и динамического гашения колебаний при активном креплении силового сенсора.

РОБОТ; СИЛОВОЕ ОЧУВСТВЛЕНИЕ; ЖЕСТКОЕ И АКТИВНОЕ КРЕПЛЕНИЕ СИЛОВОГО СЕНСОРА; ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ; ШЕРОХОВАТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ; КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ; УРОВЕНЬ ВИБРАЦИЙ РУКИ РОБОТА; ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО УСКОРЕНИЮ.

The article considers the problem of position-force control of robot movement with a force feedback sensor in the mode of contact with a free-formed surface. The surface is assumed to be rough; the robot, according to the technological task, moves with a certain speed along the surface and maintains the predetermined level of contact force. In this case the surface roughness may cause the excitation oscillation of the robot close to resonance. The article shows in what case this effect is possible and how to control the vibration of the robot. We made a comparative analysis of the vibration state of the robot with a hard and active mount of the sensor to the robot arm. It is shown that the active mounting of the force sensor can significantly reduce the level of robot arm vibration. The article investigates the possibilities of further signal feedback using the accelerometer mounted on the robot arm, and the dynamic absorbing effect with active mounting of the force sensor.

ROBOT; FORCE SENSING; HARD AND ACTIVE MOUNT OF FORCE SENSOR; POSITION-FORCE CONTROL; FREE-FORMED ROUGH SURFACE; CONTACT INTERACTION; LEVEL OF ROBOT ARM VIBRATION; ACCELERATION FEEDBACK.

Очувствление роботов с помощью силомоментных сенсоров является одной из актуальных задач робототехники [1, 2]. Силомоментные сенсоры обычно устанавливаются на руке робота в районе схвата (рабочего инструмента) для определения реактивных сил и моментов, возникающих при контактных взаимодействиях робота с внешними объектами. В робототехнике задачи с контактным взаимодействием занимают значительное место. Сюда относятся задачи роботизации сборки, механообработки и т. д. [3, 4]. Контактные задачи возникают при использовании роботов в экстремальных условиях, например, в космосе, а также в медицине [5, 6]. Несмотря на большое количество публикаций по данной проблематике, отражающих достижения робототехники, всё ещё остаётся ряд вопросов, без решения которых не обеспечить высоких показателей качества выполнения указанных выше практических задач.

В частности, обращаясь к задаче механообработки, можно отметить, что отработанных технологий автоматической шлифовки турбинных лопаток с помощью роботов до сих пор нет. Во многих случаях эта операция осуществляется вручную [3, 7]. Причина такого положения дел в отрасли определяется не только высокими требованиями к качеству и производительности при выполнении данной операции, но и её сложностью для автоматизации из-за высокого уровня неопределённости контактных операций. Одна и та же система по существу должна работать в разных режимах, обеспечивая:

- быстрое позиционирование;
- безударный выход на контакт;
- рабочий режим (шлифовку без заклиниваний);
- безударный сход с контакта.

Ситуация осложняется тем, что очувствление робота обычно связано с увеличением его механической податливости, вследствие чего во всех режимах работы появляется необходимость учёта дополнительных динамических эффектов, вибраций и т. п., приводящих к снижению качества выполнения контактных операций [4, 8].

Так, в работе [9] при синтезе законов связанного позиционно-силового управления роботом с силовым датчиком обратной связи установлен факт существенного уменьшения низшей собственной частоты робота при переходе с режима позиционирования на рабочий режим контактного взаимодействия с поверхностью неопределённого профиля. Учитывая, что поверхность может быть шероховатой, а робот, в соответствии с технологической задачей, движется с некоторой скоростью вдоль поверхности с заданным прижатием к ней, шероховатость может стать причиной возбуждения колебаний робота, близких к резонансным. В настоящей статье описывается, при каких условиях этот эффект возможен и как при этом управлять вибрационным состоянием робота.

Жесткое крепление силового сенсора

Будем рассматривать рабочий режим контактного взаимодействия робота с поверхностью, считая, что настройки позиционного и силового регуляторов осуществлялись в соответствии с процедурой, изложенной в [9, 10]. Особенностью рассмотренной в этих работах системы управления является то, что для ее работы не требуется заранее задавать профиль поверхности, как это, например, делается в [11, 12]. Профиль может быть произвольным, но достаточно гладким, чтобы исключить заклинивание.

На рис. 1 показаны два варианта установки силового сенсора на руке робота: с жестким креплением фланца сенсора m'_s к руке робота (рис. 1 а) и с активным (управляемым) креплением (рис. 1 б).

Математическая модель робота в режиме управляемого контактного взаимодействия с поверхностью при жестком креплении сенсора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) &= F - m_1 g, \\ (m_2 + m'_s) \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + \\ + c(y_2 - y_1) + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_*(t)) + c_s(y_2 - y_*(t)) &= \\ = - (m_2 + m'_s) g, \end{aligned} \quad (1)$$

$$F = \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (\tilde{y}^d - y_1),$$

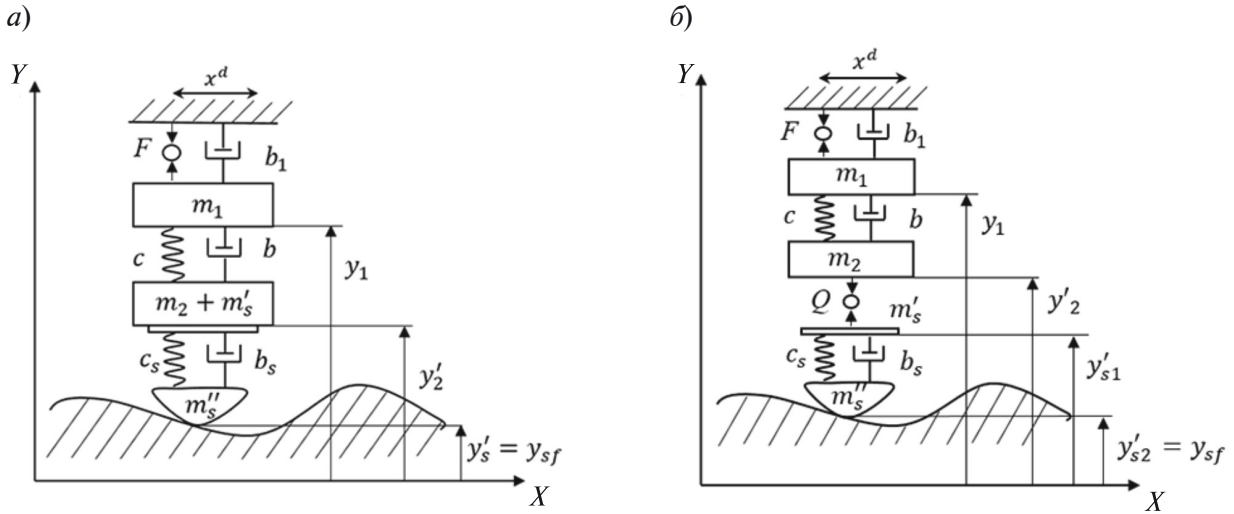


Рис. 1. Расчетные схемы руки робота с силовым очувствлением

$$\tilde{y}^d = \left(\theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (F^d - F_s). \quad (1)$$

Для руки робота принята двух-массовая расчетная схема с характерными параметрами: $m_1 = m_2 = 1$ кг, $c = 30\,000$ Н/м, $b = 20$ Нс/м. Силовой сенсор характеризуется следующими параметрами: $m'_1 = m'_2 = 0,1$ кг, $c_s = 5000$ Н/м, $b_s = 5$ Нс/м. С помощью него формируется информация о силе прижатия робота к поверхности:

$$F_s = b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_*(t)) + c_s(y_2 - y_*(t)),$$

$$y_*(t) = y_{sf}(x) \Big|_{x=x^d(t)},$$

где $y_{sf}(x)$ — вертикальная координата поверхности; $x = x^d(t)$ — координата, характеризующая программное движение робота вдоль поверхности (при движении с постоянной скоростью $x^d(t) = V_x t$).

Считается, что помимо силового сенсора робот оснащен датчиком положения по координате y_1 . В рамках принятой структуры системы управления роботом (1) допускаются и другие варианты установки датчика положения. Возможен также вариант замены контура позиционирования на контур скорости.

Формирование усилия F , развиваемого приводным двигателем робота в режиме контактного взаимодействия, осуществля-

ется в соответствии с концепцией связанного позиционно-силового управления, согласно которой контур обратной связи по положению в рабочем режиме контактного взаимодействия сохраняется без изменений по сравнению с режимом позиционирования. При этом желаемая вертикальная координата робота $\tilde{y}^d$ не задается заранее, а автоматически формируется в процессе движения робота вдоль поверхности с помощью PID-регулятора силой прижатия. В работе [9] показано, что такая двухконтурная структура системы управления позволяет устанавливать требуемое контактное взаимодействие робота с поверхностью неопределённого профиля.

В системе (1) два внешних воздействия: программное задание F^d по силе прижатия робота к поверхности и возмущающее воздействие $y_*(t)$. Будем считать, что оно содержит константу и две переменные составляющие $y_*(t) = h + y'_*(t) + y''_*(t)$. Константа h зависит от $\inf y_{sf}(x)$ и может варьироваться. Первая медленно меняющаяся составляющая $y'_*(t)$ определяется профилем поверхности и скоростью движения робота вдоль нее, а вторая быстро меняющаяся составляющая $y''_*(t)$ — шероховатостью поверхности. Предполагается, что в рабочем режиме контактного взаимодействия робота с поверхностью сила прижатия $F_s > 0$, то есть отрыва не происходит.

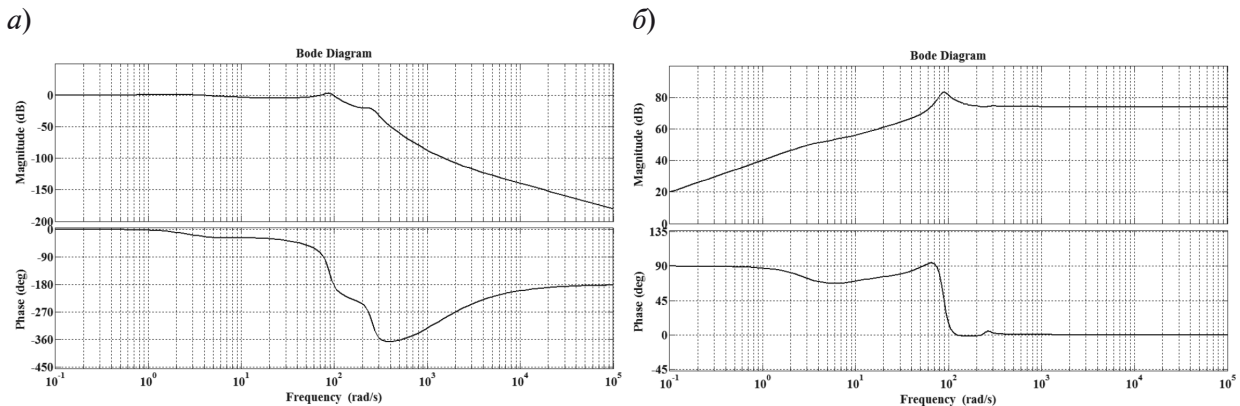


Рис. 2. Диаграммы Бode при жестком креплении сенсора

Замкнутая система (1) имеет восьмой порядок и после настроек обоих регуляторов при принятых выше числовых значениях параметров робота и силового сенсора имеет следующие корни характеристического полинома:

$$p_1 = -44,98; p_2 = -67,65; p_{3,4} = -2,57 \pm 1,82i; p_{5,6} = -11,98 \pm 87,02i; p_{7,8} = -32,2 \pm 253,18i.$$

Диаграммы Бode системы (1) от F^d к F_s приведены на рис. 2 а и от y_* к F_s — на рис 2 б.

Корни $p_{5,6}$ обусловлены податливостью силового сенсора, а корни $p_{7,8}$ — податливостью руки робота. Заметим, что в режиме позиционирования, т. е. без контура обратной связи по силе прижатия, соответствующие корни были

$$p_{5,6} = -25,97 \pm 217,25i; p_{7,8} = -32,1 \pm 264,14i. \quad (2)$$

Видно, что в режиме контактного взаимодействия робота с поверхностью произошло заметное смещение первой собственной частоты в диапазон более низких частот со значения 34,53 Гц до значения 13,85 Гц. Вторая собственная частота осталась практически без изменений в районе 40 Гц. Такое снижение первой собственной частоты резко повышает вероятность возникновения резонансных режимов, обусловленных воздействием $y_*''(t)$.

Смоделируем влияние поверхности контакта на робот суперпозицией двух синусов (рис. 3):

$$y_*(t) = h + A \sin(2\pi V_x/L)t + a \sin(2\pi V_x/l)t,$$

где $A, L/V_x$ — амплитуда и характерный период профиля поверхности; $a, l/V_x$ — амплитуда и характерный период шероховатости поверхности; V_x — скорость движения робота вдоль поверхности.

Пусть $A = 0,05$ м, $L = 1$ м, $a = 0,001$ м, $l = 0,003$ м, $V_x = 0,1$ м/с, $h = 0,1$ м. Тогда частота воздействия $y_*'(t)$ составляет $2\pi V_x/L = 0,628$ 1/с, а воздействия $y_*''(t)$ составляет $2\pi V_x/l = 209,33$ 1/с.

Таким образом, воздействие $y_*''(t)$ имеет частоту порядка 33,33 Гц, т. е. при принятых выше характерных параметрах робота и силового сенсора эта частота находится в диапазоне рабочих частот (см. рис. 2). В принципе для современных роботов малой и средней грузоподъемности резонансная область составляет примерно 10...40 Гц. Поэтому периодическое воздействие типа $y_*''(t)$ может привести к заметному ухудшению вибрационного состояния робота.

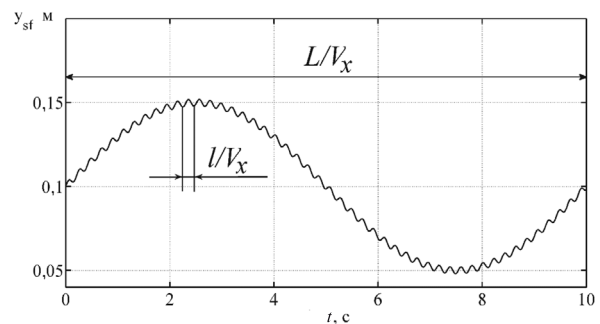


Рис. 3. Профиль поверхности контакта



Активное крепление силового сенсора

Математическая модель робота в режиме управляемого контактного взаимодействия с поверхностью при активном креплении сенсора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + c(y_1 - y_2) &= \\ &= F - m_1 g, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) &= \\ &= -Q - m_2 g, \\ m'_s \ddot{y}_{s1} + b_s(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_*(t)) + c_s(y_{s1} - y_*(t)) &= \\ &= Q - m'_s g, \end{aligned} \quad (3)$$
$$F = \left(k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (\tilde{y}^d - y_1),$$
$$\tilde{y}^d = \left(\theta_p + \theta_i \frac{1}{p} + \theta_d \frac{N}{1 + N/p} \right) (F^d - F_s).$$

В системе (3) закон управления силой F , развиваемой приводным двигателем робота, формируется так же, как в (1). Вместе с тем, из-за активного крепления сенсора появляются дополнительные степень свободы и управление Q . Актуатор, соответствующий управлению Q , может представлять собой пьезопровод [13,14]. В дальнейшем влияние актуатора будем описывать усредненной упруго-вязкой характеристикой $Q = \alpha(y_2 - y_{s1}) + \beta(\dot{y}_2 - \dot{y}_{s1})$ с настраиваемыми параметрами α и β .

Система (3) имеет десятый порядок. Ее свойства (корни характеристического полинома и диаграммы Боде) будут зависеть не только от настроек регуляторов положения и силы прижатия, но и от настроек актуатора α и β . Дополнительные настройки α и β могут использоваться для снижения уровня вибраций робота, обусловленных шероховатостью поверхности. Кроме того, в некоторых случаях можно рекомендовать известные практические приемы снижения уровня вибраций. Например, можно использовать фланец сенсора m'_s в качестве динамического гасителя [15], для повышения эффективности которого система (3) может быть охвачена дополнительной обратной связью по сигналу $\ddot{y}_2$ акселерометра, установленного на руке робота m_2 [16, 17]. В этом случае дополнительное управление

примет вид $Q = \alpha(y_2 - y_{s1}) + \beta(\dot{y}_2 - \dot{y}_{s1}) + \gamma \ddot{y}_2$.

Результаты моделирования

Проведем сравнительный анализ вибрационного состояния робота при жестком и активном креплениях силового сенсора к руке робота.

Для варианта активного крепления силового сенсора настройки регуляторов положения и силы прижатия

$$k_p = 1188,23 \text{ Н/м}, k_i = 2378,14 \text{ Н/мс},$$

$$k_d = 120 \text{ Нс/м}$$

$$\theta_p = 2,35 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н}, \theta_i = 0,01 \text{ м/сН},$$

$$\theta_d = -2,89 \cdot 10^{-7} \text{ мс/Н}$$

не менялись по сравнению с вариантом жесткого крепления силового сенсора. Рекомендуемые настройки дополнительного актуатора имеют значения $\alpha = 8000 \text{ Н/м}$, $\beta = 20 \text{ Нс/м}$.

Для коэффициента дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра установлено значение $\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{м}$.

Во всех случаях настройки осуществлялись по комплексу прямых показателей качества выполнения целевой функции робота, таких как быстродействие, перерегулирование, колебательность, добротность, уровень вибраций и т. п. Контур положения настраивался как подчиненный для контура управления силой прижатия. Настройка дополнительного актуатора осуществлялась при настроенных регуляторах положения и силы прижатия. Всего настраивалось девять коэффициентов обратных связей.

Рассмотрим более подробно рабочий режим контактного взаимодействия робота с поверхностью при активном креплении силового сенсора. При указанных выше настройках корни характеристического полинома замкнутой системы имеют вид:

— при отсутствии дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра ($\gamma = 0$)

$$p_1 = -41,28, p_2 = -57,92, p_{3,4} = -2,53 \pm 1,81i, \\ p_{5,6} = -18,86 \pm 78,37i, p_{7,8} = -32,78 \pm 252,93i, \\ p_{9,10} = -132,96 \pm 344,99i;$$

— при наличии обратной связи по сигналу акселерометра ($\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{м}$)

$$p_1 = -47,39, p_2 = -63,96, p_{3,4} = -2,52 \pm 1,8i, \\ p_{5,6} = -4,34 \pm 35,77i, p_{7,8} = -31,32 \pm 210,33i, \\ p_{9,10} = -126,21 \pm 338,96i.$$

Диаграммы Боде при активном креплении силового сенсора по сравнению с диаграммами Боде, представленными на рис. 2, показывают заметное смещение в низкочастотную область собственной частоты, обусловленной податливостью силового сенсора (корни $p_{5,6}$). Это смещение можно уменьшить отрицательной обратной связью по ускорению $\ddot{y}_2$. Однако при этом немного снижается эффективность активного крепления силового сенсора с точки зрения снижения уровня вибрации руки робота. Заметим, что при положительной обратной

связи по ускорению область устойчивости замкнутой системы заметно меньше, чем при отрицательной обратной связи.

На рис. 4 приведены графики установившихся процессов силы прижатия $F_s(t)$ и координаты руки робота $y_2(t)$ для вариантов жесткого крепления силового сенсора (рис. 4 а), активного крепления силового сенсора при $\gamma = 0$ (рис. 4 б) и активного крепления силового сенсора с дополнительной обратной связью по сигналу акселерометра при $\gamma = 5 \text{ Нс}^2/\text{м}$ (рис. 4 в).

На рис. 5 приведены графики установившихся процессов ускорения руки робота $\ddot{y}_2(t)$ для тех же вариантов крепления силового сенсора к руке робота.

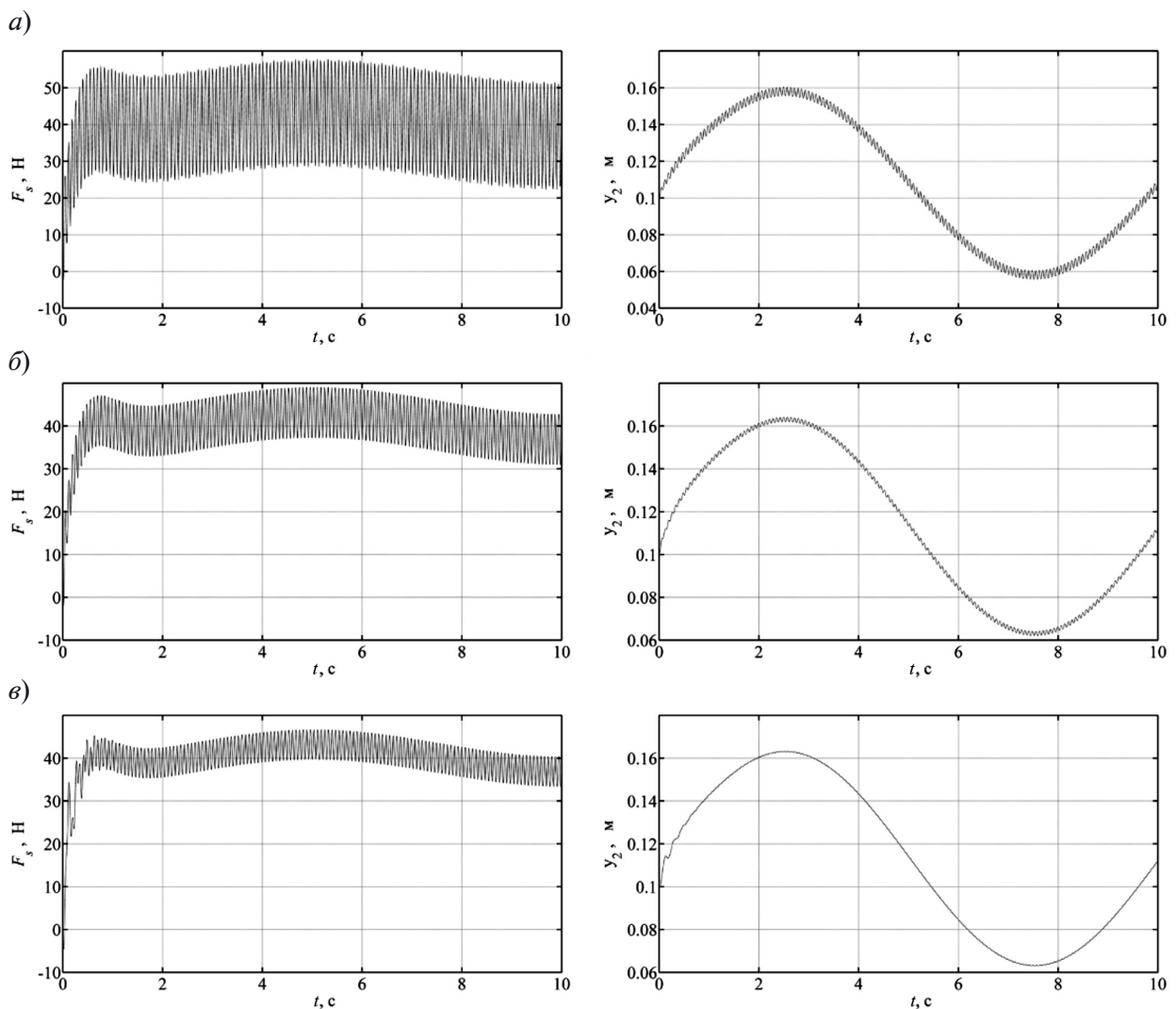


Рис. 4. Установившиеся процессы силы прижатия и координаты руки робота

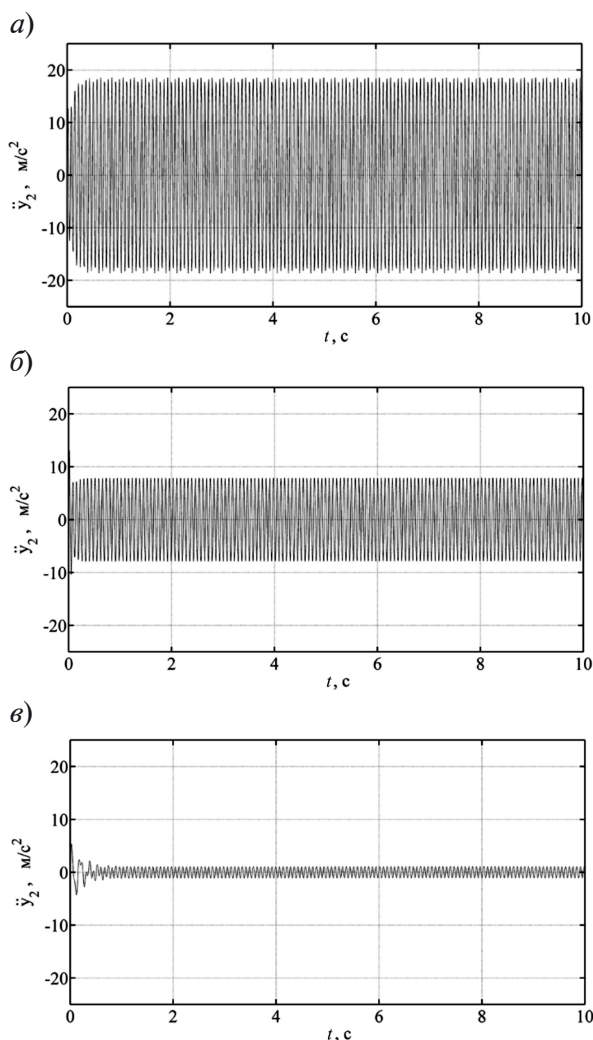


Рис. 5. Установившиеся процессы ускорения руки робота

В таблице приведены амплитудные значения отклонений от программных значений при установившихся вынужденных ко-

лебаниях для соответствующих процессов.

Программное значение силы прижатия робота к поверхности принималось равным 40 Н. Программное значение координаты руки робота соответствовало профилю поверхности. Частота кинематического возмущения $y_*(t)$, обусловленного шероховатостью поверхности, составляла $2\pi V_x/l = 87$ 1/с, то есть соответствовала первой собственной частоте робота при жестком креплении сенсора.

Видно, что при активном креплении силового сенсора к руке робота и дополнительной обратной связи по сигналу акселерометра отклонение силы прижатия робота к поверхности F_s от заданного значения $F^d = 40$ Н не превышает $\pm 8,75\%$. В то время как при жестком креплении силового сенсора, т. е. при резонансе, достигало $\pm 35\%$. При этом амплитудное значение ускорения руки робота уменьшилось почти в 20 раз.

Обратим внимание на то, что параметры робота были выбраны так, что наиболее податливым элементом является силовой сенсор c_s^{-1} , далее следует податливость крепления фланца силового сенсора к руке робота α^{-1} и, наконец, податливость руки робота c^{-1} . Такое соотношение, на наш взгляд, наиболее предпочтительное для силового очувствления роботов.

В заключение заметим, что попытка использования при активном креплении силового сенсора фланца m'_s в качестве динамического гасителя при принятых параметрах робота привела лишь к небольшому снижению уровня вибра-

Амплитудные значения отклонений от программных значений

Крепление сенсора	Сила прижатия F_s , Н	Координата руки робота y_2 , мм	Ускорение руки робота $\ddot{y}_2$, м/с ²
Жесткое	14	2,25	20
Активное	6	1	8
Активное с дополнительной обратной связью	3,5	0,15	1

ций руки робота, т. к. частота гашения $\omega_c = \sqrt{\frac{c_s + \alpha}{m'_s}}$ оказалась около 50 Гц, т. е. за пределами диапазона рабочих частот, там, где происходит естественное для динамических систем снижение уровня вибраций.

Результаты моделирования показали высокую эффективность активного крепления силового сенсора к руке робота по сравнению с жестким креплением с точки зрения снижения уровня ее вибраций, возникающих при движении вдоль контактной поверхности с шероховатостью периодического характера.

Дополнительная податливость робота, обусловленная силовым очувствлением с активным креплением силового сенсора, требует согласованной настройки регуляторов позиционного и силового контуров управления, обеспечивающей эффективное гашение упругих колебаний в диапазоне рабочих частот.

В дальнейшем будут исследованы возможности практической реализации активного крепления силового сенсора с помощью пьезопроводов, а также осуществлено развитие предложенного в статье подхода к позиционно-силовому управлению роботами с пространственной кинематической схемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modeling, Planning and Control. London: Springer, 2009.
2. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010.
3. Рассказчиков Н.Г. Управление промышленными роботами для абразивной зачистки с использованием силомоментной адаптации // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Электронный ресурс]/ URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16772>
4. Попов А.В., Юревич Е.И. Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 5. Приложение. С. 2–6.
5. [Электронный ресурс]/ URL: www.robogeek.ru/kosmicheskie-roboty
6. Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В. Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 49–53.
7. [Электронный ресурс]/ URL: www.youtube.com/шлифовка турбинных лопаток роботами
8. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука, 2011.
9. Бурдаков С.Ф., Шагннев О.Б. Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 4(224). С. 68–79.
10. Шагннев О.Б., Бурдаков С.Ф. Стабилизация силового взаимодействия робота с поверхностью неопределенного профиля // Неделя науки СПбГПУ: матер. науч.-практ. конф. Ин-т прикладной математики и механики. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 70–72.
11. Mills J.K., Goldenberg A.A. Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks // IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1989. Vol. 5. No. 1. Pp. 30–46.
12. Fisher W.D., Mujtaba M.S. Hybrid position/force control: a correct formulation // Robotics research. 1992. Vol. 11. No. 4. Pp. 299–311.
13. Жуков С.А. О пьезокерамике и перспективах её применения // Компоненты и технологии. 2001. № 1. С. 50–54.
14. Самарин А. Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
15. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968.
16. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основании информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994.
17. Градецкий А.В., Рыбак Л.А., Синев А.В., Пашков А.И. Построение управляющих регуляторов активной системы виброизоляции кинематического принципа действия // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 3. С. 88–93.



REFERENCES

1. **Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G.** *Robotics: Modeling, Planning and Control*. London: Springer, 2009.
2. **Yegorov I.N.** *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami* [Position-force control of robotic and mechatronic devices]. Vladimir: Vladimir. Gos. Un-t Publ., 2010. [rus]
3. **Rasskazchikov N.G.** Upravleniye promyshlennymi robotami dlya abrazivnoy zachistki s ispolzovaniyem silomomentnoy adaptatsii [Control of industrial robots for abrasive cleaning using force-moment adaptation]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, No. 6. Available: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=16772> [rus]
4. **Popov A.V., Yurevich Ye.I.** Pozitsionno-silovoye upravleniye manipulyatorami: sostoyaniye i perspektivy [Positional-Power Control by Manipulators: State and Perspectives]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 5, Pp. 2–6. [rus]
5. Available: www.robogeek.ru/kosmicheskieroboty [rus]
6. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Problemy razvitiya robototekhniki v vosstanovitelnoy meditsine [The Development Problems of Robotics for Restorative Medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, No. 9, Pp. 49–53. [rus]
7. Available: www.youtube.com/shlifovkaturbinnyykh lopatok robotami [rus]
8. **Yeliseyev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P.** *Mekhatronnyye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatelnykh system* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical vibration systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011. [rus]
9. **Burdakov S.F., Shagniyev O.B.** Modeli mekhaniki v zadache upravleniya silovym vzaimodeystviyem robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya [Mechanics Models in the Control Problem of the Force Interaction between a Robot and a Free-Formed Surface]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2015, No. 4(224), Pp. 68–79. [rus]
10. **Shagniyev O.B., Burdakov S.F.** Stabilizatsiya silovogo vzaimodeystviya robota s poverkhnostyu neopredelennogo profilya [The stabilization force interaction with the surface of the robot indefinite profile]. *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut prikladnoy matematiki i mekhaniki*. St Petersburg: Politekh. Un-t Publ., 2014, Pp. 70–72. [rus]
11. **Mills J.K., Goldenberg A.A.** Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1989, Vol. 5, No. 1, Pp. 30–46.
12. **Fisher W.D., Mujtaba M.S.** Hybrid position/force control: a correct formulation. *Robotics research*, 1992, Vol. 11, No. 4, Pp. 299–311.
13. **Zhukov S.A.** O pyezokeramike i perspektivakh yeye primeneniya [About piezoceramic and prospects of its application]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2001, No. 1, Pp. 50–54. [rus]
14. **Samarin A.** Miniaturnyye lineynyye pyezoelektricheskiye dvigateli [Miniature linear piezoelectric motors]. *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2006, No. 10. [rus]
15. **Babakov I.M.** *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow: Nauka Publ., 1968. [rus]
16. **Gorinevskiy D.M., Formalskiy A.M., Shneyder A.Yu.** *Upravleniye manipulyatsionnymi sistemami na osnovanii informatsii ob usiliyakh* [Manipulation systems management based on information on the efforts]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994. [rus]
17. **Gradetskiy A.V., Rybak L.A., Sinev A.V., Pashkov A.I.** Postroyeniye upravlyayushchikh regulyatorov aktivnoy sistemy vibroizolyatsii kinemacheskogo printsipa deystviya [The Design of Control Regulators of an Active Vibration-Proof Insulation System of the Kinematic Action Principle]. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International], 1996, No. 3, Pp. 88–93. [rus]

БУРДАКОВ Сергей Федорович — профессор кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

BURDAKOV Sergey F. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

БАЙДИНА Татьяна Александровна — магистрант кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

BAYDINA Tatiana A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: baydinatanya2401@gmail.com

ШАГНИЕВ Олег Булатович — инженер 2 категории кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: shagnoleg@yandex.ru

SHAGNIEV Oleg B. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: shagnoleg@yandex.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.252.5

УДК 004.925.5

В.Э. Янчус, Е.В. Борович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ГАРМОНИЗАЦИИ КИНОКАДРА

V.E. Yanchus, E.V. Borevich

A STUDY OF THE EFFECT OF COLOR PALETTE IN THE PROCESS OF FILM FRAME HARMONIZATION

Описан эксперимент, задачей которого является исследование влияния фактора цветового решения кинокадра на восприятие его зрителем. В эксперименте использовались три цветовых схемы: монохромная, комплементарная и триадная. Рассмотрен процесс разработки стимульного материала и методика проведения эксперимента. В качестве теоретической модели экспериментального исследования использована бинарная модель цветового восприятия человека. Установлено, что фактор цветового решения имеет значимое влияние на процесс сканирования изображения человеком, это необходимо учитывать при гармонизации кадра. Сформулированы определенные правила для решения комплексной задачи гармонизации кинокадра от момента его проектирования до этапа постобработки. Наиболее сложным цветовым решением является триада, однако кадр при этом получается наиболее читаемым в условиях его перегруженности.

КИНЕМАТОГРАФ; ГАРМОНИЗАЦИЯ КАДРА; ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ; ЦВЕТОВОЕ РЕШЕНИЕ; АЙ-ТРЕКЕР; ЭКСПЕРИМЕНТ.

We studied the impact that a color palette chosen for a film frame has on the scanning and recognition process of the human eye. We used three color palettes: mono-color, complimentary colors, and three-color. The experiment, including the preparation of picture frames, and collection of data is described in detail. A binary model of the human color vision was used for theoretical confirmation of the experimental data. We have shown that the choice of the color palette has an impact on the scanning process of a film frame by the human eye. Therefore, the color palette can be used during film frame formatting to enhance and enrich the cinematic experience. ANOVA statistical analysis of the data allows to formulate several rules for film frame harmonization at every step of the frame production (from frame design to frame post production). We show that a three-color palette is the most readable but also the most complex to realize.

CINEMA; FILM FRAME HARMONIZATION; HUMAN COLOR VISION; CHOICE OF COLOR PALETTE; EYE-TRACKER; EXPERIMENT.

В настоящее время, когда черно-белый кинематограф ушел в историю и подавляющая масса кино- и видеопродукции выполняется в цвете, нельзя утверждать, что проблема цвета в кино полностью решена [1]. Технологии киноиндустрии определяют формат продукта и, соответственно, режис-

серскую работу над фильмом. Часто можно наблюдать, что цвет в кадре является модным трендом, а не тонким инструментом воплощения режиссерского замысла. И если огромный технический потенциал и накопленный творческий опыт, обусловленные финансовыми вложениями, позво-

ляют некоторым киностудиям студиям, например WetaDigital, решать поставленные задачи работы с цветом на высоком художественном уровне, то ситуация в видеоарт произведениях значительно сложнее [2].

Видеоарт как авангардное направление в медиаискусстве обладает определенной спецификой, связанной с использованием художественных образов для создания настроения в произведении. В решении творческой задачи создания образов в художественном произведении роль цвета как инструмента гармонизации кадра переоценить сложно. Принципы гармонизации кинокадра, в отличие от графических произведений, имеют некоторые особенности, связанные, прежде всего, с конечным временем демонстрации кадра, определяемым принципами монтажа и режиссурой фильма.

Цель настоящей работы — определить степень влияния фактора цветового решения на восприятие кинокадра зрителем. Полученные данные целесообразно использовать при решении задачи повышения визуальной привлекательности кинокадра и разработке некоторых методических рекомендаций для гармонизации кадра и его художественной цветокоррекции.

Объект исследования работы — кинокадр. Предмет исследования — шаблон рассматривания кинокадра. Под шаблоном рассматривания понимается набор количественных параметров глазодвигательной активности, получаемый с помощью измерительного оборудования (eye-tracker) при рассматривании испытуемым стимульного материала.

Теоретическая модель эксперимента

Для проведения исследования и постановки эксперимента использовалась бинарная модель цветового восприятия человека [3].

Установлено, что мозг принимает информацию от сетчатки только в виде двоичного (бинарного) кода: «да» — «нет», причем сигналы передаются по независимым каналам. Современные научные данные свидетельствуют, что одностадийная трехкомпонентная теория восприятия цвета

Юнга—Гельмгольца действительна только на стадии рецепторного (колбочкового) фотохимического анализа светового стимула. На стадии пострецепторного анализа происходит перекодирование в соответствии с теорией Геринга по двум цветным (К-З) и (Ж-С)-каналам и одному черно-белому (ЧБ) каналу (рис. 1) [3].

Ведущий специалист в области цветоведения, академик международной академии «Модус колорис», Флориан Ильич Юрьев рассматривает актуальные проблемы цветовой выразительности книги, прослеживает пути и методы создания цветового образа, отражающего ее содержание. Производство книг относится к области полиграфии, все цветовые решения выполняются применительно к статическому изображению и носят сугубо качественный характер.

Кроме этого, Юрьев указывает, что зрительная система человека является наиболее информативным каналом получения информации: «Количественный метод представления зрительной информации создает для мозга сложную ситуацию, выход из которой один — качественное изменение этой информации путем увеличения информативной емкости каждого отдельного ее блока. И в этом отношении цвет является таким качеством визуального объекта, которое дает дополнительные сведения об этом» [3].

В [4] авторы утверждают, что существовавшая модель цветового видения, в которой за восприятие объектов отвечает только канал ЧБ (бесцветный), а функции цвета заключаются только в создании эмоционального фона, устарела. Эта модель цветового видения носит название «книжка-раскраска». В результате анализа серии проведенных экспериментов получены данные, указывающие на то, что функции цветового зрения значительно шире. «Цвет способствует решению ряда сложных визуальных задач, таких, как сегментация объектов; восприятие формы и глубины сцены; восприятие контуров; обнаружение, идентификация и запоминание объектов; восприятие движения сложных объектов; признание теней» [4].

В условиях динамически изменяющейся

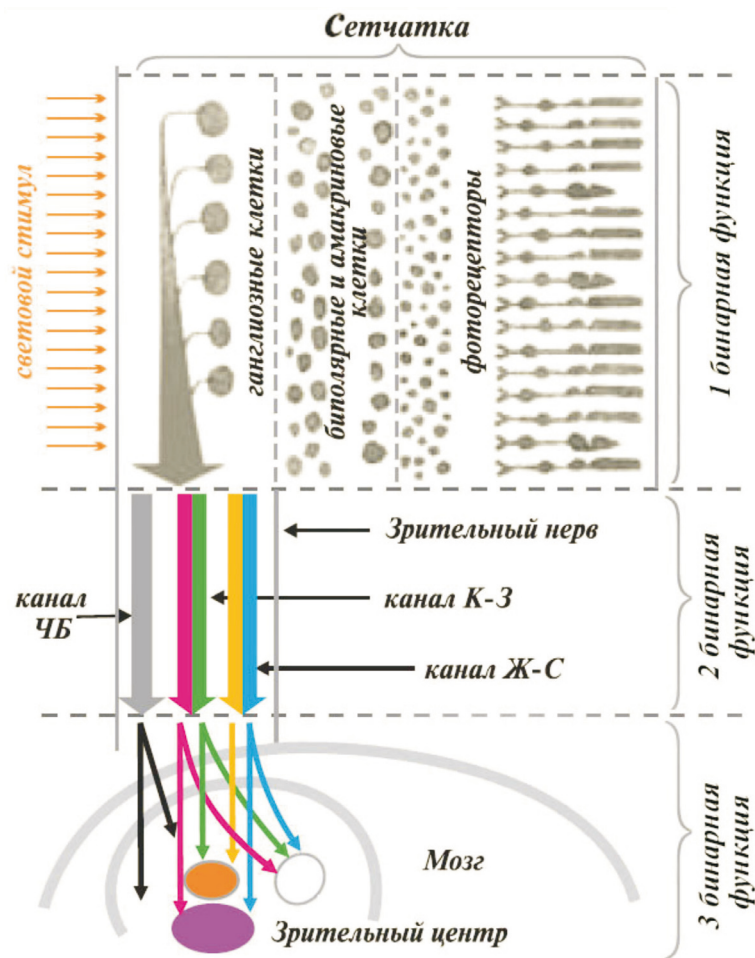


Рис. 1. Схема биарных функций цветового восприятия. Три биарных функции: 1 – прием света на сетчатку; 2 – транслирование в мозг; 3 – суммирование информации по каналам

картинки ситуация несколько иная. Юрьев указывает, что процесс цветового зрения динамичен, подчинен внутренней логике диалектического познания реальности. «Великое множество физических стимулов, которые попадают в глаз в любой последовательности, мозг обрабатывает стадийно» [3]. Последовательная передача информации и неоднородность передающих визуальную информацию каналов (см. схему на рис. 1) могут влиять на формирование образа наблюдаемой сцены в головном мозге человека при конечном времени наблюдения. Принимая во внимание конечное время кинокадра, можно предположить, что эти особенности зрительной системы человека будут влиять на достоверность прочтения кадра зрителем.

Методы

Стимулы. Для составления визуального ряда, стимульного материала, выбраны кадры из фильмов. Содержимое кадров отвечало ряду требований, таких как эмоциональная нейтральность и наличие минимальной смысловой нагрузки, однако предметность должна сохраняться. Кроме того, кадры были выбраны таким образом, чтобы изображение имело два центра интереса, имеющих разные взаимные отношения площадей (рис. 2) [5].

Для постановки эксперимента были выбраны три разных цветовых решения кинокадра в соответствии с теорией цвета и цветовых контрастов по И. Иттену и контрольное черно-белое решение изображений.



Рис. 2. Исходные изображения

Два и более цвета являются гармоничными, если их смесь представляет собой нейтральный серый цвет. Цветовые решения, построенные на основе гармоничных цветов, являются наиболее контрастными [6].

Цветовые решения в стимульном материале изменялись таким образом, что в результате были получены изображения, которые однозначно можно разделить на следующие группы (рис. 3):

- Монохроматическая схема. Создание группы оттенков на основе изменений насыщенности и светлоты.

- Комплементарная схема. Вариации по насыщенности и светлоте для тоновой пары цветов. Использование двух противоположных (дополнительных или комплементарных) цветов ведет к яркому визуальному выделению взаимодополняющих элементов кадра.

- Триадная схема. Вариации по насыщенности и светлоте для триадных цветов. Эта схема популярна среди художников и дизайнеров, т. к. она предлагает сильный визуальный контраст, сохраняя при этом яркий баланс и цветовую насыщенность [7].

- Ахроматическая схема (черно-белые изображения). Необходима для контрольной группы испытуемых.

Создание стимульного материала проходило в несколько этапов. На первом этапе исходный кард преобразовывался в четырех цветовых решениях (рис. 4).

Преобразование цвета в кадрах производилось вручную с помощью инструментария Adobe Photoshop CS6. На оригинальное изображение накладывались фотофильтры в соответствии с необходимым цветовым решением.

Для черно-белой гармонии использо-

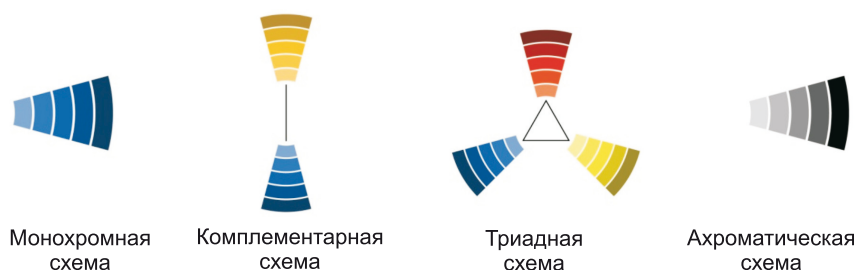


Рис. 3. Цветовые схемы, выбранные для проведения эксперимента



Рис. 4. Пример преобразования оригинального изображения в четырех цветовых решениях

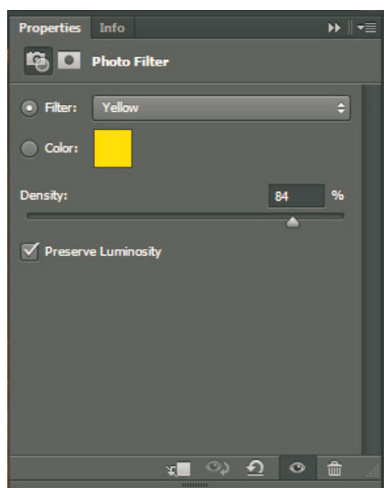


Рис. 5. Значение параметра фотофильтра Yellow для создания комплементарной схемы

вался фильтр **Black&White без дополнительной маски**. Для монохромного решения на изображение накладывался PhotoFilter Blue (R 29 G 53 B 234) без маски со значением параметра Density 80 %.

Для комплементарной схемы были использованы два PhotoFilter: Blue (R 29 G 53 B 234) со значением параметра Density 80 % и Yellow (R 249 G 227 B 28) со значением параметра Density 84 % (рис. 5). Эти фильтры были наложены на изображение с ин-

версными масками для центров интереса изображения и для их фона (рис. 6).

Для создания триадной схемы цветового решения использовались три PhotoFilter: Blue (R 29 G 53 B 234) со значением параметра Density 80 %, Yellow (R 249 G 227 B 28) со значением параметра Density 84 % и Red (R 234 G 26 B 26) со значением параметра Density 81 %. Им соответствовали три маски: по одной на каждый центр интереса и третья для фона (рис. 7).

После преобразования кадров в соответствии с цветовыми решениями было сделано десять вариантов энтропии одного и того же изображения (рис. 8). Размытие изображения было выполнено в программе MatLab. В листинге представлен программный код для выполнения этой процедуры. Данная операция проводилась с целью уменьшения влияния смысловой нагрузки на восприятие кадра.

Зашумление изображения равносильно внесению определенного хаоса в упорядоченную систему. В теории передачи информации существует понятие «энтропии» как меры упорядоченности. Мы, используя это понятие, ввели фактор условной энтропии, как некоторой дискретной единицы, характеризующей степень зашумленности кадра (далее – энтропия).

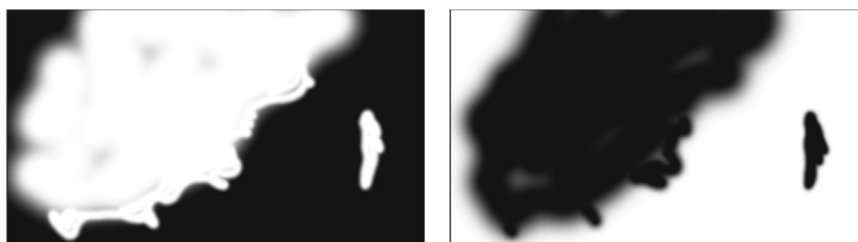


Рис. 6. Инверсные маски для фотофильтров для создания комплементарных изображений



Рис. 7. Маски фотофильтров для создания триадной схемы

```
% I1=imread('1.jpg');
% subplot(3,5,1);
% imshow(I1); title('1');

h1 = fspecial('average', 20);
...
h10 = fspecial('average', 29);

J11= imfilter(I, h1);
J12=imnoise(J11,'gaussian',0.2);
J1=imnoise(J12,'salt & pepper',0.01);
subplot(3,5,2);
imshow(J1);title('Рисунок 1');
//делаем 10 степеней энтропии
E0=entropy(I)
E1=entropy(J1)
...
E10=entropy(J10)

% imwrite(J1,'кудасохраняемновуюкартинку\141.jpg','Quality', 100);
```

Текст кода для одной картинки



Рис. 8. Пример преобразования изображения в 10 вариантах энтропии

Испытуемые. В эксперименте участвовало сорок испытуемых, разделенных на четыре фокус-группы, в каждой группе было по десять человек. Испытуемыми являлись студенты в возрасте от 17 до 24 лет. Каждой группе демонстрировались стимулы только в одном цветовом решении.

В ходе эксперимента испытуемым сначала показывали семь кадров без заключительного этапа обработки, в качестве оригинальных изображений, а затем в случайном порядке подготовленные стимулы. Испытуемым предлагалось соотнести демонстрируемые стимулы с оригинальными изображениями.

Во время эксперимента испытуемые

сидели перед монитором компьютера, на который выводились стимулы. Кресло, на котором сидел испытуемый, было настроено для каждого индивидуально в целях удобства. Голова располагалась на специальной подставке, чтобы исключить свободное перемещение в пространстве во время эксперимента. Каждой фокус-группе демонстрировались стимулы с одинаковым цветовым решением. Испытуемым было дано задание определить номер картинки, которую они видят. Сначала им показывали все кадры, участвующие в эксперименте, без наложения эффекта энтропии, чтобы они запомнили картинки. Далее на монитор выводили все стимулы по одному



на весь экран в случайном порядке. Испытуемому необходимо было указать для каждого демонстрируемого стимула номер изображения, соответствующий оригинальному. В итоге каждый испытуемый смотрел на семь картинок одной гармонии в десяти вариантах энтропии в случайном порядке.

Стоит отметить, что порядок чередования стимулов с разным уровнем энтропии был выстроен следующим образом с целью исключить ситуацию, когда испытуемому, в результате рандомизации показываемых картинок, демонстрируется подряд семь картинок с высоким уровнем энтропии. Уровни энтропии в ходе эксперимента было решено чередовать («высокий» и «низкий»). Порядок чередования был задан одинаковый для всех испытуемых. Первый стимул всегда был с третьим уровнем энтропии. Далее уровни энтропии шли в следующем порядке – 3, 6, 2, 9, 1, 7, 4, 10, 5, 8. Но при этом стимул, соответствующий заданному уровню энтропии, выбирался случайным образом из семи картинок.

Инструментальные средства эксперимента. Измерение направления человеческого

взгляда с помощью eye-tracker технологий является широко применяемым и действенным методом когнитивной психологии (рис. 9). Прибор использует бесконтактные оптические методы регистрации движения глаз. Инфракрасная подсветка отражается глазным яблоком и регистрируется специально разработанным оптическим сенсором. В процессе обработки видеозаписи получается информация об ориентации глазного яблока в пространстве и её временная динамика. В данной области исследования выделяют целый ряд различных типов движения глаз. Основные из них – это медленные следящие движения (фиксации) и быстрые движения глаз, которые могут быть произвольными или рефлекторными (саккады) [8].

Результаты. Полученные с помощью оборудования измерения глазодвигательной активности (eye-tracker) параметрические данные исследовали на предмет зависимости от двух факторов энтропии и цветового решения. Все выборки имели нормальное распределение, что позволило использовать стандартные математические методы статистической обработки данных. Проверка на нормальность распределения

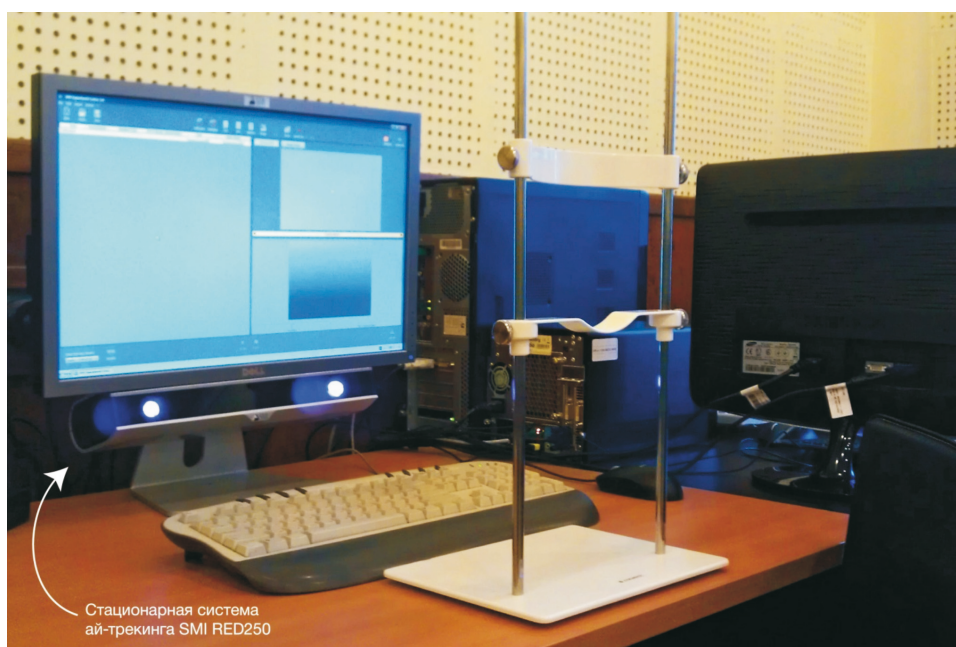


Рис. 9. Экспериментальная установка оборудования (eye-tracker)

осуществлялась с помощью теста Шапиро–Уилка (*shapiro.test*) — стандартной процедуры языка «R». Язык «R» — статистическое программное обеспечение для анализа экспериментальных данных.

В результате проведенного эксперимента получены зависимости параметров шаблона рассматривания, измеряемых с помощью eye-tracker, от двух факторов: цветового решения и энтропии.

Фактор цветового решения принимает следующие значения:

- bw — соответствует группе испытуемых, которым демонстрировались черно-белые изображения;
- three — соответствует группе испытуемых, которым демонстрировались триадные изображения;
- dop — соответствует группе испытуемых, которым демонстрировались комплементарные изображения;
- once — соответствует группе испытуемых, которым демонстрировались монохромные изображения.

Фактор энтропии принимает значения от 1 до 10.

Рассматривалось влияние этих факторов на следующие параметры:

- средняя длительность фиксации (Mean Fixation Duration) (рис. 10);
- средняя длительность первой фиксации (First Fixation Duration) (рис. 11);
- среднее количество фиксаций на один стимул (Number of Fixations) (рис. 12);
- среднее время рассматривания одного стимула (Mean Total Time) (рис. 13);
- среднее количество саккад на один стимул (Number of Saccade) (рис. 14);
- средняя дистанция саккад на один стимул (Distance of Saccade) (рис. 15).

Интерпретация результатов. Для анализа данных используем дисперсионный анализ ANOVA [9]. Как указывалось выше, в эксперименте участвовало сорок испытуемых. Испытуемые работали с 280 стимулами, по десять испытуемых на 70 стимулов в четырех цветовых решениях. Всего было собрано 9778 фиксаций.

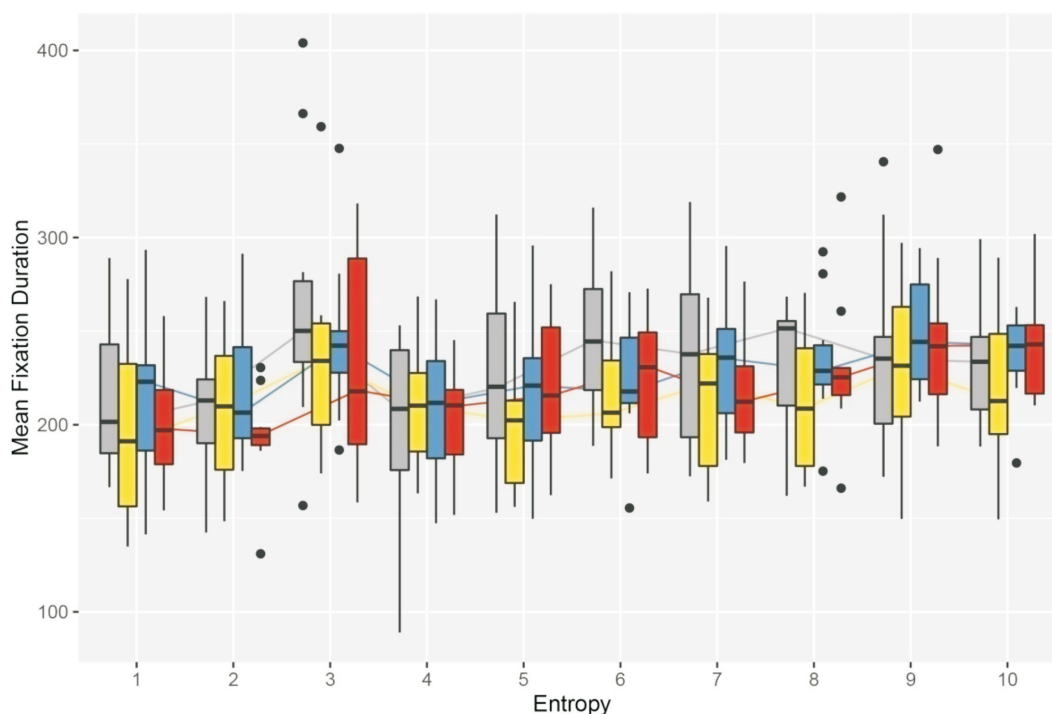


Рис. 10. График зависимости средней длительности фиксации от энтропии

factor(Color) bw dop once three

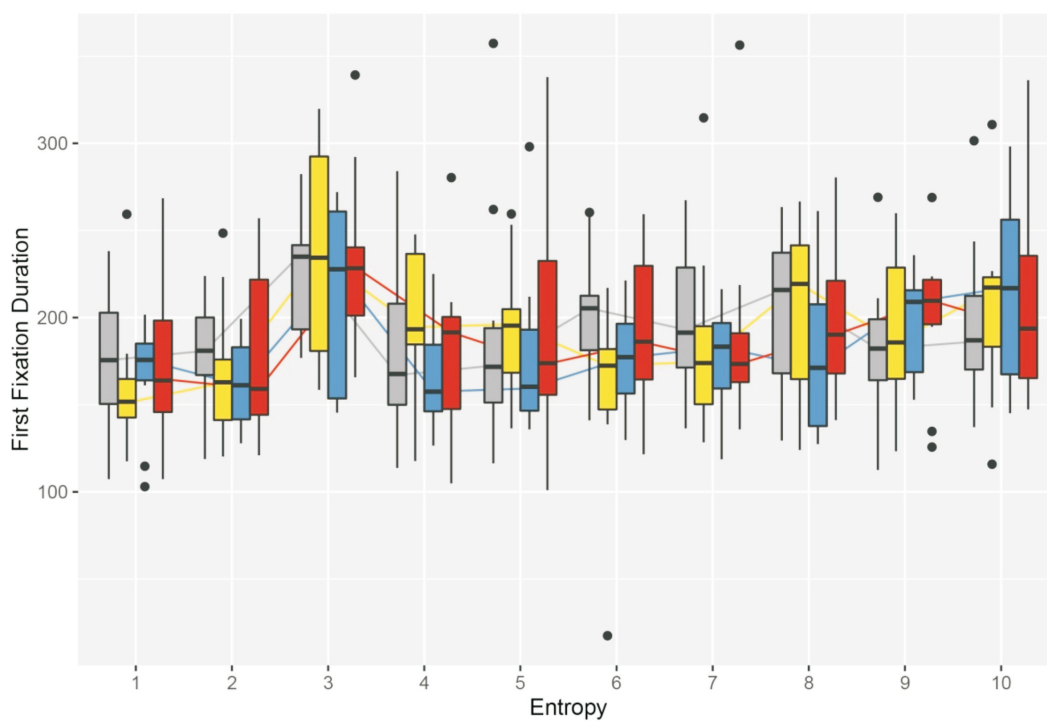


Рис. 11. График зависимости средней длительности первой фиксации от энтропии

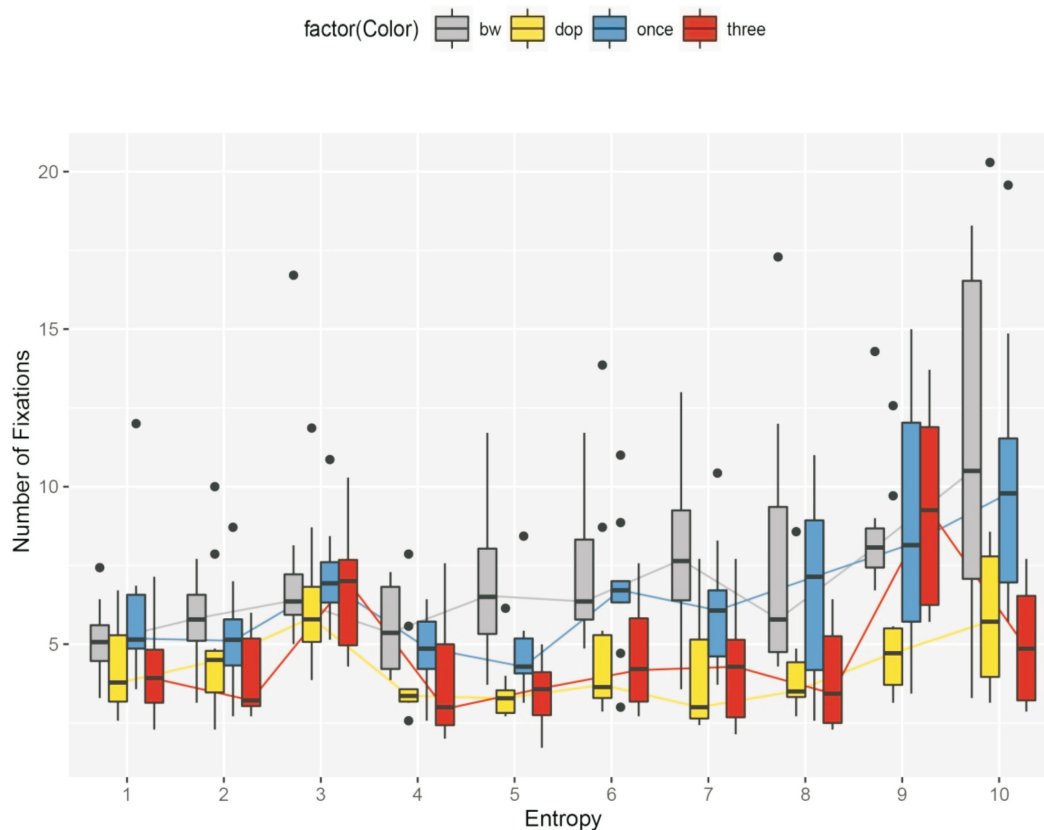


Рис. 12. График зависимости среднего количества фиксации на один стимул от энтропии

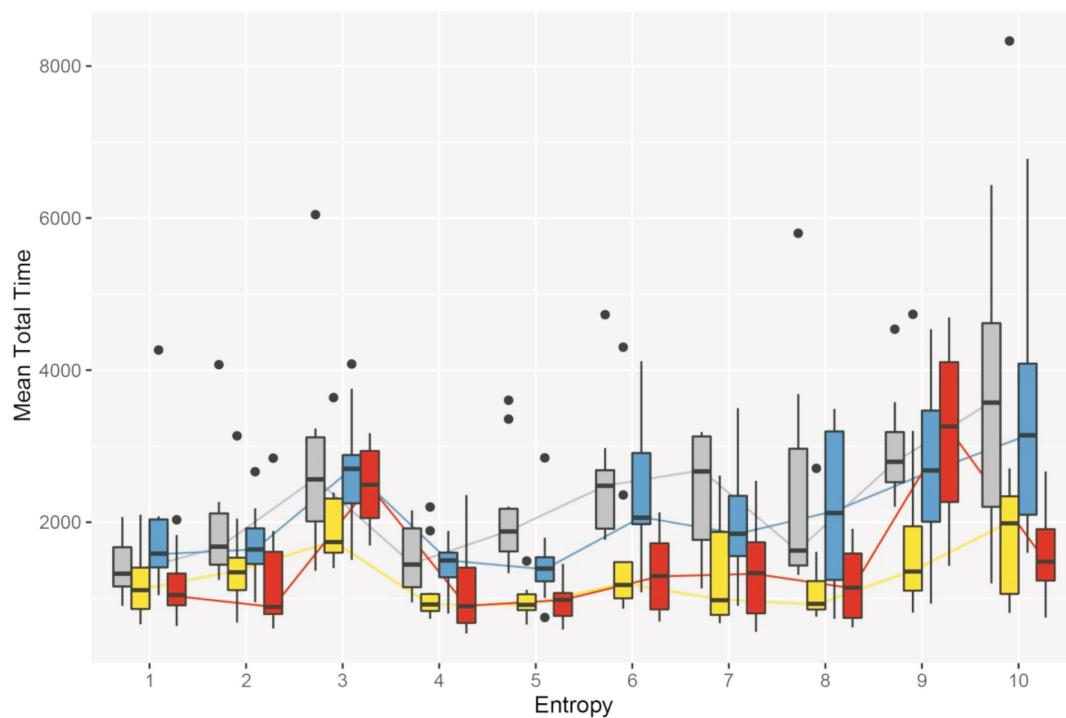


Рис. 13. График зависимости средней длительности рассматривания одного стимула от энтропии

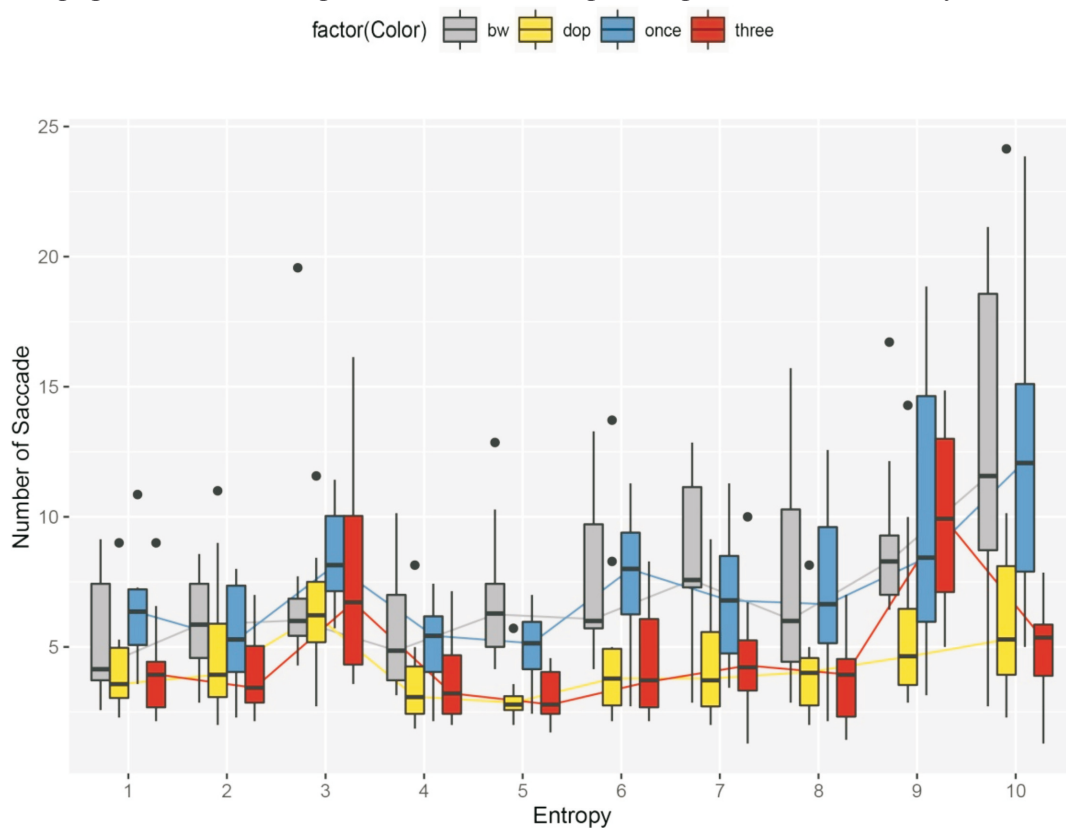


Рис. 14. График зависимости среднего количества саккад на один стимул от энтропии

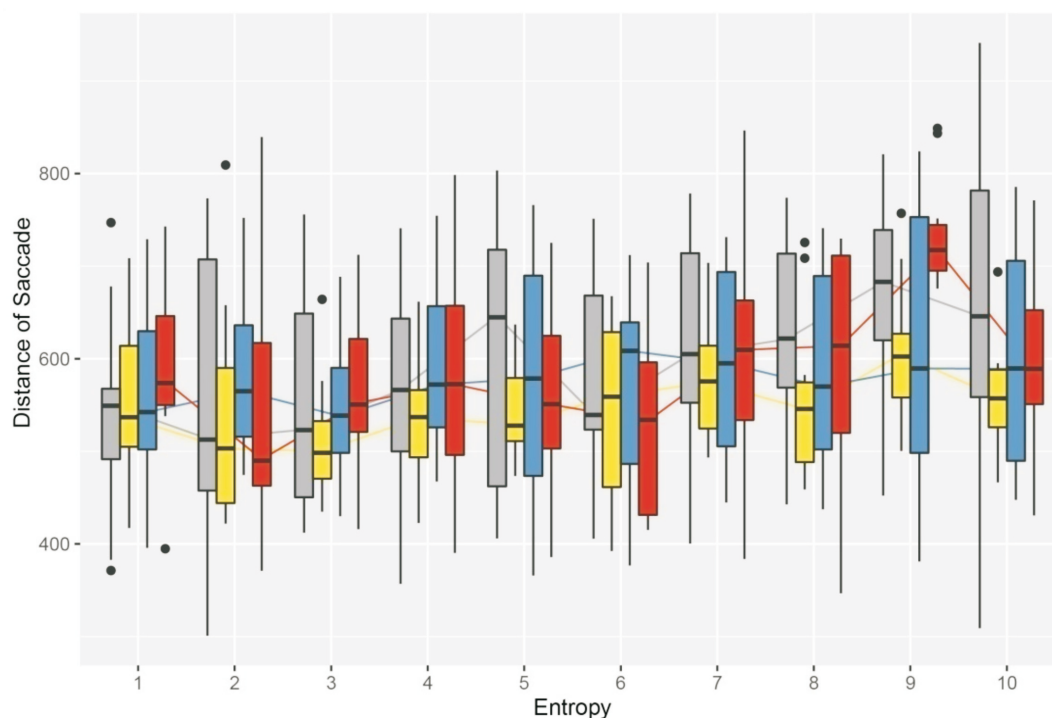


Рис. 15. График зависимости средней дистанции саккад на один стимул от энтропии

factor(Color) bw dop once three

Сводные данные анализа представлены в табл. 1. Можно сделать некоторые общие выводы:

1. Фактор энтропии имеет влияние на все измеряемые параметры.

2. Фактор цветового решения не имеет статистически значимого влияния на среднюю длительность фиксации, среднюю длительность первой фиксации и среднюю дистанцию саккад.

3. Фактор цветового решения имеет статистически значимое влияние на среднюю длительность рассматривания стимула, среднее количество фиксаций и среднее количество саккад на один стимул.

Следует заметить, что три параметра, имеющие статистически значимое влияние фактора цветового решения, связаны между собой. Время рассматривания стимула включает в себя суммарную длительность

Таблица 1

Значимость влияния фактора энтропии и фактора цветового решения на измеряемые параметры

Параметр	Entropy		Color	
	Значение статистики Фишера	p-value	Значение статистики Фишера	p-value
Mean Total Time	F(1,36)=36,518	6.09e-07	F(3,36)=8,586	0,000197
Number of Fixations	F(1,36)=41,966	1.6e-07	F(3,36)=6,769	0,000977
Mean Fixation Duration	F(1,36)=37,216	5.1e-07	F(3,36)=0,534	0,662
First Fixation Duration	F(1,36)=19,240	9.62e-05	F(3,36)=0,271	0,846
Number of Saccade	F(1,36)=27,32	8.09e-06	F(3,36)=6,116	0,00186
Distance of Saccade	F(1,36)=20,365	6.92e-05	F(3,36)=0,501	0,684

ность фиксаций и суммарную длительность саккад. Поскольку среднее время фиксации и среднее время саккад — величины достаточно постоянные, время фиксаций можно приблизительно вычислить путем умножения длительности фиксации на их количество. Аналогичная ситуация и с саккадами. Можно утверждать, что время рассматривания стимула прямопропорционально связано с количеством фиксаций и количеством саккад.

Задача зрительной системы человека включает в себя два этапа: первый — сканирование изображения (происходит на уровне сетчатки; изображение не имеет смысловой нагрузки); второй этап — создание образа и его интерпретация (происходит в головном мозге; изображение становится осмысленным) (рис. 16). Сканирование изображения — подсознательная процедура: глаз словно ощупывает изображение. Время этапа сканирования зависит от таких параметров, как длительность фиксации и дистанция саккад. Распознавание образа требует подключения аналитической работы головного мозга для интерпретации отсканированного изображения. Время этапа распознавания образа зависит от количества фиксаций и саккад. Полученные в эксперименте данные указывают на то, что требуемое для сканирования изображения время — величина постоянная, а время распознавания стимула зависит от содержания

картинки и условий ее рассматривания.

Из результатов статистической обработки данных следует, что процесс сканирования изображения не зависит от фактора цветового решения. Влияние энтропии на процесс сканирования существует, но имеет неявный характер. Связано это, предположительно, с ухудшением условий сканирования (зашумленностью) изображения. Распознавание образа требует аналитической работы головного мозга. Здесь мы можем наблюдать статистически значимое влияние фактора цветового решения.

Анализируя шаблон рассматривания стимульного материала, можно говорить о схожести работы зрительной системы человека при обработке черно-белых и монохромных изображений. Также схожесть наблюдается при обработке триадных и комплементарных изображений.

Рассмотрим график зависимости среднего времени рассматривания стимула от энтропии в различных цветовых решениях. Начиная с пятого уровня энтропии, можно наблюдать, что среднее время рассматривания стимула в черно-белом и монохромном цветовом решении больше, чем в триадном и комплементарном (см. рис. 13). Результаты дисперсионного анализа подтверждают наличие статистической зависимости от фактора цветового решения. На основании этого можно утверждать, что при увеличении энтропии (увеличении зашумленности

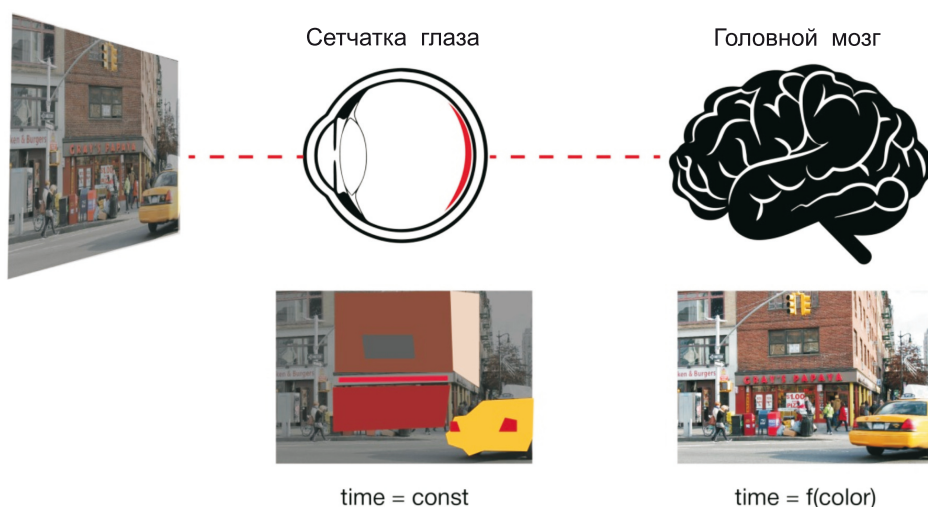


Рис. 16. Работа зрительной системы человека по распознаванию образа



картинки) в черно-белом и монохромном изображениях увеличивается время анализа кадра. Это говорит о том, что испытуемому необходимо более детально его рассматривать для «прочтения» содержания кадра и выполнения поставленной в эксперименте задачи. На основании этого можно сделать вывод о том, что с ухудшением условий сканирования изображения усложняется процесс распознавания. Контрастное цветовое решение кадра (триадное и комплементарное) позволяет испытуемым решать задачу распознавания точнее. То есть цвет помимо определенного эмоционального фона несет информацию о форме объектов в кадре. Это позволяет более четко формировать композиционное построение кадра.

При работе с кадром в ахроматическом или монохромном цветовом решении важнейшим моментом является облегчение фона сцены. Загруженность фона усложняет зрителю анализ композиции, что может привести к неправильной трактовке кадра. Связано это с невысоким контрастом изображений используемых цветовых решений (в сравнении с дополнительным и триадным).

Выводы

Фактор цветового решения имеет приоритетное значение в технологии гармонизации кинокадра. Полученные результаты позволяют сформулировать некоторые правила для построения кинокадра в соответствии с жанром произведения и правильной интерпретации его зрителем:

при работе с ахроматическим или монохромным кадром важнейшим моментом является облегчение фона сцены: кадр необходимо «вычищать», убирать мелкие, незначимые элементы, которые ведут к перегруженности кадра и, как следствие, к увеличению времени его анализа;

использование комплементарного цветового решения (с применением двух противоположных, иными словами, дополнительных или комплементарных цветов) является самым простым способом ускорения восприятия кадра. Этот прием работы с цветом является мировым трендом и используется во всех жанрах кино, где проис-

ходит частая смена кадров;

наиболее сложным цветовым решением является триада. Данное цветовое решение требует использования большего количества основных цветов в кадре, но и кадр при этом получается наиболее читаемым в условиях его перегруженности.

Следует отметить, что при постановке эксперимента был сделан ряд допущений. Связано это с тем, что для проведения эксперимента было необходимо разработать методику его проведения (разработка стимульного материала, определение решаемой испытуемыми задачи, выбор параметров для статистического анализа) таким образом, чтобы определить параметры шаблона рассматривания, которые зависят от цветового решения.

Основным допущением является то, что подготовленный стимульный материал создавался на основе кадров, имеющих определенное цветовое решение, соответствующее задумке режиссера фильма. Раскрашивая эти кадры в выбранные для эксперимента цветовые схемы, мы изменяем цветовое решение кадра. Это не совсем корректно, поскольку нельзя говорить об универсальности цветовых решений. Рациональность использования того или иного цветового решения кадра зависит от настроения и сюжета видео. В одном кадре в зависимости от настроения и сюжета фильма уместно одно цветовое решение, в другом — другое.

Второе допущение: в эксперименте использовались статические кадры (точнее, фреймы). Кинокадр имеет значительно более сложную структуру. Кроме определенного жизненного цикла, в кадре, как правило, происходит движение, взаимное смещение центров интересов (они называются *главными объектами*), т. е. кинокадр имеет динамически меняющуюся композицию, что, безусловно, влияет на шаблон рассматривания.

Эти моменты будут решаться в следующих экспериментах. Задачи планируемых экспериментов построены следующим образом:

исследование запоминаемости кадров в зависимости от цветового решения;

изучение эмоциональной нагрузки при

Таблица 2

Среднее количество фиксаций и среднее количество саккад на один стимул*

	Bw		once		dop		three	
Энтропия	Fix	Sac	Fix	Sac	Fix	Sac	Fix	Sac
3	7,39	8,04	7,14	7,87	6,39	6,3	7,29	7,94
6	7,36	7,46	6,77	7,43	5,27	4,91	4,56	4,14
2	5,66	5,99	5,30	5,51	4,91	4,89	3,93	3,83
9	8,60	9,71	8,71	9,47	5,67	5,68	9,43	9,61
1	4,89	5,31	6,02	6,29	4,10	4,20	4,13	3,94
7	7,61	8,20	6,21	6,67	4,14	4,33	4,33	4,26
4	5,09	5,60	4,81	4,87	3,94	3,61	3,79	3,64
10	11,20	12,07	10,27	11,84	6,94	7,2	5,09	4,60
5	6,89	7,01	4,74	5,00	3,46	2,96	3,34	2,99
8	7,64	7,39	6,67	7,03	4,10	3,94	3,94	3,60

*Fix – среднее количество фиксаций, Sac – среднее количество саккад

решении задачи нахождения центра интереса в кинокадре в зависимости от цветового решения.

В ходе исследования мы получили результаты, требующие дополнительного исследования. Из полученных данных можно сделать вывод о схожести шаблона рассматривания монохромных и ахроматических изображений. Анализ данных не выявил статистически значимых различий. Есть предположение, что различия существуют, но более тонкие, и условия эксперимента не позволяют их зафиксировать. Необходимо изменить условия эксперимента, чтобы выяснить влияние монохромной цветовой схемы.

Необходимо также обратить внимание на взаимное отношение средних величин количества фиксаций и количества саккад на один стимул (табл. 2).

Можно заметить, что в случае монохромных и ахроматических изображений среднее количество саккад больше среднего количества фиксаций. В случае дополнительного цветового решения и триады, среднее количество саккад, как правило, меньше среднего количества фиксаций. Можно предположить наличие влияния фактора цветового решения на эти параметры шаблона рассматривания, но это требует изменения условий эксперимента.

Описанный эксперимент был направлен на решение задачи исследования влияния фактора цветового решения кинокадра на восприятие его зрителем. В эксперименте использовались три цветовых схемы: монохромная, комплементарная и триадная. В статье подробно описан процесс подготовки стимульного материала и методика проведения эксперимента. В результате эксперимента установлено, что фактор цветового решения имеет значимое влияние на процесс распознавания изображения человеком. Данные результаты можно использовать в композиционном построении кадра на начальном этапе проектирования фильма: на этапе раскадровки. В зависимости от режиссерской идеи можно использовать соответствующее цветовое решение:

использование определенного цветового решения влияет на скорость чтения кадра зрителем, что влечет за собой возможность управления длительностью кадра. В зависимости от режиссерского замысла можно, используя цветовые решения, управлять динамикой повествования фильма;

контрастные цветовые решения существенно облегчают задачу композиционного построения кадра, поскольку цвет передает дополнительную информацию о форме и идентификации объектов кадра, взаимном



их расположении и глубине сцены;
при использовании триадного цветового решения кадр получается наиболее читаемым в условиях его перегруженности.

Однако триада является наиболее сложным цветовым решением, т. к. требует использования большего количества основных цветов в кадре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарковский А.А. Беседа о цвете // Киноведческие записки. 1988. № 1.
2. Янчус В.Э., Шабловский В.Г., Боревиц Е.В. Видеоарт как авангардное кино // Дизайн. Материалы. Технология. 2016. № 1. С. 104–107.
3. Юрьев Ф.И. Цветовая образность информации. Т. 2. Гармония сфер. Киев, 2007. С. 15.
4. Chirimuuta M., Kingdom F.A.A. The Uses of Colour Vision: Ornamental, Practical, and Theoretical // *Minds & Machines*. Received: 23.09.2014. Accepted: 03.03.2015. Publ. online: 28.06.2015. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015.
5. Боревиц Е.В., Мещеряков С.В., Янчус В.Э. Экспериментальное исследование компьютерной цветокоррекции на основе бинарной модели визуального восприятия // Компьютерное моделирование — 2016: труды национальной науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 280–288.
6. Иттен И. Искусство цвета. М.: Изд. Аронов Д., 2014. С. 21–24.
7. Лаптев В.В. Инфографика в цифровом искусстве. М.: АВАТАР, 2015. С. 101–104.
8. Орлов П.А., Лаптев В.В., Иванов В.М. К вопросу о применении систем ай-трекинга // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 5(205). С. 84–94. [Электронный ресурс] / URL: http://ntv.spbstu.ru/telecom/article/T5.205.2014_08/
9. Гланц С. Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. М.: Практика, 1998. 459 с.

REFERENCES

1. Tarkovskiy A.A. Beseda o tsvete [Talk about color]. *Kinovedcheskiye zapiski*, 1988, No. 1. (rus)
2. Yanchus V.E., Shablovskiy V.G., Borevich E.V. Video art as an avant-garde cinema. *Design. Materials. Technology*, 2016, No. 1, Pp. 104–107. (rus)
3. Yuryev F.I. The harmony of the spheres. *Color imagery information*. Kiyev, 2007, Vol. 2, P. 15. (rus)
4. Chirimuuta M., Kingdom F.A.A. The Uses of Colour Vision: Ornamental, Practical, and Theoretical. *Minds & Machines*. Received: 23.09.2014. Accepted: 03.03.2015. Publ. online: 28.06.2015. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015.
5. Borevich Ye.V., Meshcheryakov S.V., Yanchus V.E. Experimental research of computer color correction based on the binary model of visual perception. *Computer Modelling — 2016 (COMOD-2016): Proceedings of the National Science and Technology Conference*. St. Petersburg: Politekh. un-t Publ., 2016, Pp. 280–288. (rus)
6. Itten I. *Art of color*. Moscow: Aronov Publ., 2014, Pp. 21–24. (rus)
7. Laptev V.V. *Infographics in digital art*. Moscow: AVATAR Publ., 2015, Pp. 101–104. (rus)
8. Orlov P.A., Laptev V.V., Ivanov V.M. On the question of the application of eye-tracking systems. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems], 2014, No. 5(205), Pp. 84–94. Available: http://ntv.spbstu.ru/telecom/article/T5.205.2014_08/ (rus)
9. Glants S. *Biomedical Statistics*. Moscow: Praktika Publ., 1998, 459 p. (rus)

ЯНЧУС Виктор Эдмундасович — старший преподаватель кафедры инженерной графики и дизайна Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: victorimop@mail.ru

YANCHUS Victor E. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: victorimop@mail.ru

БОРЕВИЧ Екатерина Владиславовна — студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: plasma5210@mail.ru

BOREVICH Ekaterina V. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: plasma5210@mail.ru



Special Session on Information Management in Human-Centric Systems (IMHCS'17): CALL FOR PAPERS

As an event of the **3rd IEEE International Conference on Cybernetics (IEEE CYBCONF 2017)**

June 21 – 23, 2017, Exeter, UK

<http://cse.stfx.ca/~CybConf2017/>

Scope and Objectives

The Special Session on Information Management in Human-Centric Systems is focused on discussing current trends in information acquisition, representation and processing in human-centric systems and applications.

We particularly welcome high quality contributions related to the topics which include but not limited to:

- Information Management
- Data and Subject Domain Modeling
- Information Retrieval and Data Science
- Human-Centric Design and Architectures
- Computer Assisted Learning and Agile Education
- Intelligent Internet-of-Things
- Intelligent User Interfaces and Usability
- Ambient User Experience
- Data Representation and Visualization
- Collaborative Environments
- Recommendation Systems
- Knowledge Engineering
- Social Networks

Important Dates

Paper Submission	February 23, 2017
Authors Notification	April 22, 2017
Camera-Ready Paper	May 15, 2017
Early Registration	May 15, 2017
Conference	June 21 – 23, 2017

Submission and Publication

Authors are invited to submit original previously unpublished research papers written in English, of up to 8 pages (or 10 pages with over length charge) including figures and references using IEEE Computer Society Proceedings Manuscripts style. Submission templates and author instructions can be found on the CYBCONF 2017 conference webpage. At least one of the authors of any accepted paper must be registered for the conference, pay the conference fee and present the accepted paper.

Presented papers will be included into the IEEE conference proceedings published by IEEE Computer Society Press and submitted to be indexed in CPCi (ISI conferences and part of Web of Science) and Engineering Index (EI).

The authors of selected best papers will be invited to extend their contributions and to submit the post-conference articles to the special issues of prestigious journals, such as IEEE Transactions on Cybernetics, IEEE SMC Magazine, Evolving Systems, and Peer-to-Peer Networking and Applications (PPNA).

DOI: 10.5862/JCSTCS.252.6

УДК 621.436-55

Е.А. Серикова, С.А. Сериков

НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

E.A. Serikova, S.A. Serikov

NEURAL NETWORK APPROXIMATION OF INTERNAL-COMBUSTION ENGINE CHARACTERISTICS

Для создания математических моделей сложных технических объектов наиболее предпочтительным является подход, использующий аппроксимацию экспериментальных данных. В качестве инструмента аппроксимации целесообразно применять системы интеллектуального анализа данных, в частности, системы нечёткого вывода и искусственные нейронные сети (ИНС).

В статье представлены результаты применения ИНС прямого распространения для построения математической модели двигателя внутреннего сгорания. Математическая модель создана путём аппроксимации следующих исходных данных: скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания, показателей экономичности и токсичности отработавших газов. В процессе вычислительных экспериментов исследована зависимость ошибки аппроксимации характеристик двигателя от структуры и параметров модели. Созданная модель позволяет в дальнейшем решать задачи анализа и оптимизации рабочих процессов двигателя на задаваемых тягово-скоростных режимах транспортных средств.

ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ; ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ; ИДЕНТИФИКАЦИЯ; ТОПЛИВНАЯ ЭКОНОМИЧНОСТЬ; ТОКСИЧНОСТЬ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ.

The most preferable approach to develop mathematical models of complex technical objects is based on experimental data approximation. It is reasonable to use data mining systems, in particular, fuzzy inference systems and artificial neural networks (ANN) as an approximation tool.

The article presents the results of applying a feedforward ANN to developing a mathematical model of an internal combustion engine. The mathematical model is developed through approximating the following basic data: internal combustion engine speed characteristics, efficiency and exhaust toxicity indicators. During computing experiments, the approximation error of the engine characteristics versus the model structure and parameters has been investigated. The developed model allows to solve further problems connected with analysis and optimization of the engine's working processes for specified traction and high-speed modes of vehicles.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK; INTERNAL COMBUSTION ENGINE; IDENTIFICATION; FUEL EFFICIENCY; ENGINE EMISSIONS.

Оптимизация рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) оказывает существенное влияние на показатели его топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ). Для решения задач анализа и оптимизации рабочих процессов двигателя на задаваемых тягово-скоростных режимах транспортных средств (ТС) ключевой является проблема идентификации его математической модели. При этом предпоч-

тительными оказываются математические модели, полученные в результате аппроксимации экспериментальных характеристик ДВС, которые снимают в процессе стендовых испытаний двигателей.

Анализ публикаций

При аналитическом описании рабочих процессов ДВС возникает противоречие между сложностью такого описания и уров-



нем идеализации модели. При этом математическая модель может оказаться бесполезной с точки зрения решения поставленных задач как при ее излишней сложности, так и в случае пренебрежения существенными взаимосвязями, определяющими характер протекания рабочих процессов.

Математические модели ДВС в виде систем дифференциальных уравнений, полученных на основе анализа термодинамических процессов в камере сгорания, впускном и выпускном коллекторах, особенностей взаимодействия систем смесеобразования и зажигания, кинематических связей между различными узлами и агрегатами и т. д., оказываются чрезвычайно сложными и громоздкими [1, 2]. Линеаризация данных уравнений приводит к существенному возрастанию невязки выходов модели и объекта при необходимости использовать модель в широком диапазоне эксплуатационных режимов ДВС.

Более предпочтительными оказываются математические модели, полученные в результате аппроксимации экспериментальных характеристик ДВС, которые снимают в процессе стендовых испытаний двигателей. В [3] рассмотрены методы автоматической идентификации параметров силового агрегата автомобиля при непосредственном испытании на стенде, что позволяет в реальном масштабе времени получить силовые и кинематические параметры модели. В работах [4, 5] представлена полиномиальная аппроксимация статических характеристик, полученных в результате стендовых испытаний. Данный подход требует большого объема экспериментальных данных, а также делает математическую модель достаточно громоздкой в случае, когда различные участки области допустимых режимов работы двигателя аппроксимируют отдельными полиномами.

В условиях высокой стоимости экспериментальных данных, их ограниченного количества, высокой зашумленности, неполноты, а часто и противоречивости, эффективными оказываются модели на основе систем нечеткого вывода и искусственных нейронных сетей (ИНС) [6–8]. Использование нечеткой аппроксимации

характеристик ДВС позволяет учитывать априорные слабоформализованные знания о протекающих рабочих процессах и использовать результаты стендовых испытаний для уточнения модели. Достоинствами ИНС является простота автоматизации процесса идентификации модели при описании как статических, так и динамических свойств системы, выборочная чувствительность в областях сосредоточения данных и гладкая интерполяция характеристик в других областях [9, 10]. В настоящее время актуальна разработка формального подхода к нейросетевой аппроксимации характеристик ДВС.

Постановка задачи

Математическая модель ДВС представляет собой некоторый оператор $F : U \mapsto Y$, в соответствии с которым каждому входному вектору

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \\ \beta \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} \in U \subset \mathbb{R}^4, \quad \forall t; \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ \dot{\omega}_{\min} \leq \dot{\omega} \leq \dot{\omega}_{\max} \\ 0 \leq \beta \leq 1 \\ \dot{\beta}_{\min} \leq \dot{\beta} \leq \dot{\beta}_{\max} \end{bmatrix},$$

где ω — скорость вращения коленчатого вала (КВ); β — положение органа управления мощностью; $\dot{\omega} = d\omega/dt$; $\dot{\beta} = d\beta/dt$, ставится в соответствие выходной вектор

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} M_e \\ G_T \\ C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} \in Y \subset \mathbb{R}^5, \quad \forall t; \quad (2)$$

$$Y = \begin{bmatrix} M_{e \min} \leq M_e \leq M_{e \max} \\ 0 \leq G_T \leq G_{T \max} \\ 0 \leq C_{NOx} \leq C_{NOx \max} \\ 0 \leq C_{CO} \leq C_{CO \max} \\ 0 \leq C_{HC} \leq C_{HC \max} \end{bmatrix},$$

где M_e – эффективный момент вращения КВ; G_T – часовой расход топлива; C_{NOx} – часовая эмиссия оксидов азота; C_{CO} – часовая эмиссия оксида углерода; C_{HC} – часовая эмиссия углеводородов.

Учитывая, что постоянные времени большинства физико-химических процессов, протекающих в двигателе, малы по сравнению с постоянной времени ТС, ДВС будем считать безынерционным объектом. В этом случае размерность входного вектора можно сократить:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \omega \\ \beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} \in U \subset \mathbb{R}_+^2, \quad \forall t; \quad (3)$$

$$U = \left[\begin{array}{c} \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \beta \leq 1 \end{array} \right].$$

Оператор модели F должен быть в определенном смысле наилучшим образом приближен к неизвестному оператору объекта F^* . Близость операторов будем оценивать исключительно по близости их реакций на одно и то же входное воздействие. Процесс идентификации математической модели заключается в определении структуры Ω оператора F и вектора неизвестных параметров модели P :

$$F = \langle \Omega, C \rangle. \quad (4)$$

Процесс идентификации должен опираться на экспериментально полученные скоростные и нагрузочные характеристики ДВС, обеспечивать простоту настройки модели на конкретный тип двигателя, обладать достаточной помехозащищенностью, являться автоматическим или

автоматизированным.

Идентификация модели ДВС

В настоящее время неизвестны методы нахождения оптимальной структуры ИНС при решении конкретных задач аппроксимации характеристик. Вместе с тем известно, что ИНС с одним скрытым и одним выходным слоем способна аппроксимировать с любой заранее заданной точностью на компактном множестве произвольную непрерывную функцию.

Будем аппроксимировать статические свойства ДВС при помощи иерархической структуры ИНС, реализующих отображения:

$$[\tilde{M}_e, G_T]^T = F_1(\omega, \beta); \quad (5)$$

$$[C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC}]^T = F_2(\omega, M_e).$$

Регулировочная характеристика выбранного ДВС, в соответствии с которой происходит ограничение максимальных оборотов КВ при низкой нагрузке, моделируется при помощи зависимости:

$$M_e(\tilde{M}_e, \omega) = \min(\tilde{M}_e, M_{ep}(\omega)); \quad (6)$$

$$M_{ep}(\omega) = k_{p1}\omega + k_{p0},$$

где k_{p0} , k_{p1} – параметры регулировочной характеристики.

Для реализации отображений F_1 и F_2 используются трехслойные ИНС прямого распространения с линейными нейронами в выходном слое. В качестве активационных функций нейронов скрытых слоев выбраны функции гиперболического тангенса:

$$\begin{cases} N_{11} = 2 : (1 + \exp(-2(W_{11}[\bar{\omega}, \bar{\beta}]^T + B_{11}))) - 1 \\ N_{12} = 2 : (1 + \exp(-2(W_{12}N_{11} + B_{12}))) - 1 \\ [\bar{M}_e, \bar{G}_T]^T = W_{13}N_{12} + B_{13} \end{cases}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_{21} = 2 : (1 + \exp(-2(W_{21}[\bar{\omega}, \bar{M}_e]^T + B_{21}))) - 1 \\ N_{22} = 2 : (1 + \exp(-2(W_{22}N_{21} + B_{22}))) - 1 \\ [\bar{C}_{NOx}, \bar{C}_{CO}, \bar{C}_{HC}]^T = W_{23}N_{22} + B_{23} \end{cases}, \quad (8)$$

где N_{11} , N_{12} , N_{21} , N_{22} – векторы выходов нейронов первого и второго слоев соответственно; W_{11} , W_{12} , W_{13} , W_{21} , W_{22} , W_{23} –

матрицы весовых коэффициентов нейронов; B_{11} , B_{12} , B_{13} , B_{21} , B_{22} , B_{23} – векторы смещений нейронов первого, второго и



третьего слоев соответственно.

Нормирование и денормирование сигналов ИНС F_1 осуществляется согласно выражениям:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\bar{\omega}}{\bar{\beta}} \right] &= 2 \left(\left[\frac{\omega}{\beta} \right] - \left[\frac{\min\{\omega\}}{\min\{\beta\}} \right] \right) : \\ &: \left(\left[\frac{\max\{\omega\}}{\max\{\beta\}} \right] - \left[\frac{\min\{\omega\}}{\min\{\beta\}} \right] \right) - 1; \\ \left[\frac{\tilde{M}_e}{G_T} \right] &= 0,5 \left(\left[\frac{\max\{M_e\}}{\max\{G_T\}} \right] - \left[\frac{\min\{M_e\}}{\min\{G_T\}} \right] \right) * \\ &* \left(\left[\frac{\tilde{M}_e}{\tilde{G}_T} \right] + \left[\frac{1}{1} \right] \right) + \left[\frac{\min\{M_e\}}{\min\{G_T\}} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где $\min\{\omega\}$, $\min\{\beta\}$, $\max\{\omega\}$, $\max\{\beta\}$, $\min\{M_e\}$, $\min\{G_T\}$, $\max\{M_e\}$, $\max\{G_T\}$ – соответственно минимальные и максимальные значения множеств ω_i , β_i , M_{ei} и G_{Ti} , $i = \overline{1, N_1}$; N_1 – количество точек $\{M_{ei}, \omega_i, \beta_i\}$ и $\{G_{Ti}, \omega_i, \beta_i\}$ экспериментально полученных статических характеристик ДВС, которые используются при обучении ИНС. Знаками «:» и «*» обозначается поэлементное деление и поэлементное умножение векторов соответственно.

Для ИНС F_2 выражения нормирования и денормирования имеют вид:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\bar{\omega}}{\bar{M}_e} \right] &= 2 \left(\left[\frac{\omega}{M_e} \right] - \left[\frac{\min\{\omega\}}{\min\{M_e\}} \right] \right) : \\ &: \left(\left[\frac{\max\{\omega\}}{\max\{M_e\}} \right] - \left[\frac{\min\{\omega\}}{\min\{M_e\}} \right] \right) - 1; \\ \left[\begin{matrix} C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{matrix} \right] &= 0,5 \left(\left[\frac{\max\{C_{NOx}\}}{\max\{C_{CO}\}} \right] - \left[\frac{\min\{C_{NOx}\}}{\min\{C_{CO}\}} \right] \right) * \\ &* \left(\left[\frac{\bar{C}_{NOx}}{\bar{C}_{CO}} \right] + \left[\frac{1}{1} \right] \right) + \left[\frac{\min\{C_{NOx}\}}{\min\{C_{CO}\}} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\min\{\omega\}$, $\min\{M_e\}$, $\min\{C_{NOx}\}$, $\min\{C_{CO}\}$, $\min\{C_{HC}\}$, $\max\{\omega\}$, $\max\{M_e\}$, $\max\{C_{NOx}\}$, $\max\{C_{CO}\}$, $\max\{C_{HC}\}$ – соответственно минимальные и максимальные значения множеств ω_j , M_{ej} , C_{NOxj} , C_{COj} и C_{HCj} , $j = \overline{1, N_2}$; N_2 – количество то-

чек $\{C_{NOxj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $\{C_{COj}, \omega_j, M_{ej}\}$ и $\{C_{HCj}, \omega_j, M_{ej}\}$ экспериментально полученных характеристик токсичности отработавших газов ДВС, которые используются при обучении ИНС.

Задача структурной идентификации модели ДВС может быть параметризована, т. е. различные структуры могут кодироваться вектором структурных параметров $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{F} = \langle \mathbf{D}, \mathbf{P} \rangle. \quad (13)$$

В данном случае элементами вектора $\mathbf{D}$ является количество нейронов в скрытых слоях ИНС F_1 и F_2 , которое определяет размерности соответствующих матриц весовых коэффициентов и смещений нейронов. В свою очередь элементами вектора $\mathbf{P}$ неизвестных параметров модели являются элементы матриц весовых коэффициентов и смещений нейронов ИНС F_1 и F_2 , а также параметры регуляровочной характеристики k_{p0} и k_{p1} .

Будем считать, что в результате стендовых испытаний ДВС были получены множества точек $\{M_{ei}, \omega_i, \beta_i\}$, $\{G_{Ti}, \omega_i, \beta_i\}$, $i = \overline{1, N_1}$ и $\{C_{NOxj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $\{C_{COj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $\{C_{HCj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $j = \overline{1, N_2}$, которые представляют собой репрезентативную выборку экспериментальных данных и достаточно точно отражают поведение скоростных характеристик ДВС, показателей его экономичности и токсичности ОГ при $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, $\beta \in [0, 1]$.

Если параметры $\mathbf{P}_3 = [k_{p0}, k_{p1}]$ регуляровочной характеристики заданы, идентификация математической модели ДВС сводится к определению структуры и параметров нейронных сетей F_1 и F_2 :

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{D}, \mathbf{P} \rangle &= \langle [\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2], [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3] \rangle = \\ &= \begin{cases} \arg \min_{\mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1} J_1(\mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1) \\ \arg \min_{\mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2} J_2(\mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2) \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

где целевые функционалы имеют вид:

$$\begin{aligned} J_1(\mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1) &= \frac{1}{N_1} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \psi_1(i, \mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1); \\ J_2(\mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2) &= \frac{1}{N_2} \cdot \sum_{j=1}^{N_2} \psi_2(j, \mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2). \end{aligned} \quad (15)$$

В свою очередь функции невязки выхо-

дов модели и объекта в каждой точке экспериментальных характеристик:

$$\begin{cases} \psi_1(i, \mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1) = (M_{ei} - y_{11})^2 + (G_{Ti} - y_{12})^2 \\ [y_{11}, y_{12}]^T = F_1(\omega_i, \beta_i, \mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1) \end{cases}; \quad (16)$$

$$\begin{cases} \psi_2(j, \mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2) = (C_{Noxj} - y_{21})^2 + \\ + (C_{Coj} - y_{22})^2 + (C_{Hcj} - y_{23})^2 \\ [y_{21}, y_{22}, y_{23}]^T = F_2(\omega_j, M_{ej}, \mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2) \end{cases}. \quad (17)$$

Для решения идентификационной задачи могут использоваться известные методы обучения нейронных сетей [9–12]. Одним из таких методов, который показал свою высокую эффективность при решении рассматриваемой задачи, является алгоритм SCG (Scaled Conjugate Gradient Algorithm), предложенный Моллером (Moller). Этот алгоритм объединяет идеи метода сопряженных градиентов с квазиньютоновыми методами [12].

Экспериментальные исследования

В качестве исходных данных для идентификации математической модели ДВС использовались результаты экспериментальных исследований двигателя МеМЗ-307 на нагрузочном стенде. Эксплуатационные режимы ДВС были ограничены допустимыми скоростями вращения КВ: $\omega_{\min} = 62,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\max} = 732,7 \text{ с}^{-1}$. Приняты следующие параметры регулировочной характеристики $k_{p0} = 0,7643 \cdot \omega_{\max} [\text{Нм}]$, $k_{p1} = -0,7643 \text{ Нм} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$. В результате обработки экспериментальных характеристик были получены множества точек $\{M_{ei}, \omega_i, \beta_i\}$, $\{G_{Ti}, \omega_i, \beta_i\}$, $\{C_{Noxj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $\{C_{Coj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $\{C_{Hcj}, \omega_j, M_{ej}\}$, $i = \overline{1, N_1}$, $N_1 = 157$, $j = \overline{1, N_2}$, $N_2 = 160$, необходимые для обучения нейронных сетей.

В дальнейшем при обучении ИНС F_1 на этих множествах были выделены обучающее ($N_{\pi} = 106$ точек) и контрольное ($N_{\nu} = 51$ точка) подмножества. При обучении ИНС F_2 из-за отсутствия избыточности в экспериментальных данных, с точки зрения описания сложных поверхностей характеристик токсичности, контрольное подмножество точек не выделялось. Для предотвращения эффекта переобучения применялось

ограничение длительности обучения сети – 800 эпох. Для обучения нейронных сетей применялся алгоритм SCG.

Качество аппроксимации характеристик ДВС сетью F_1 оценивалось по величине среднеквадратического значения ошибки на контрольном подмножестве точек:

$$\begin{cases} \sigma_{Me} = \left(\frac{1}{N_{\nu 1}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\nu 1}} (M_{ei} - y_{11})^2 \right)^{1/2} \\ \sigma_{G_T} = \left(\frac{1}{N_{\nu 1}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\nu 1}} (G_{Ti} - y_{12})^2 \right)^{1/2} \\ [y_{11}, y_{12}]^T = F_1(\omega_i, \beta_i, \mathbf{D}_1, \mathbf{P}_1) \end{cases}, \quad (18)$$

$$i = \overline{1, N_{\nu 1}}.$$

Качество аппроксимации характеристик токсичности ОГ ДВС нейронной сетью F_2 оценивалось по величине среднеквадратического значения ошибки на обучающем множестве точек:

$$\begin{cases} \sigma_{Nox} = \left(\frac{1}{N_2} \cdot \sum_{j=1}^{N_2} (C_{Noxj} - y_{21})^2 \right)^{1/2} \\ \sigma_{Co} = \left(\frac{1}{N_2} \cdot \sum_{j=1}^{N_2} (C_{Coj} - y_{22})^2 \right)^{1/2} \\ \sigma_{Hc} = \left(\frac{1}{N_2} \cdot \sum_{j=1}^{N_2} (C_{Hcj} - y_{23})^2 \right)^{1/2} \\ [y_{21}, y_{22}, y_{23}]^T = F_2(\omega_j, M_{ej}, \mathbf{D}_2, \mathbf{P}_2) \end{cases}, \quad (19)$$

$$j = \overline{1, N_2}.$$

Результаты обучения ИНС показывают, что качество аппроксимации характеристик ДВС существенно зависит от общего количества нейронов и лишь незначительно – от их распределения по слоям. Следовательно, структуры сетей F_1 и F_2 с достаточной точностью можно характеризовать только одним параметром – числом синаптических весов (количеством свободных параметров нейронной сети):

$$k_{F1} = 3k_{11} + (k_{11} + 1)k_{12} + 2(k_{12} + 1); \quad (20)$$

$$k_{F2} = 3k_{21} + (k_{21} + 1)k_{22} + 3(k_{22} + 1), \quad (21)$$

где k_{11} , k_{12} , k_{21} и k_{22} – количество нейронов в скрытых слоях ИНС.

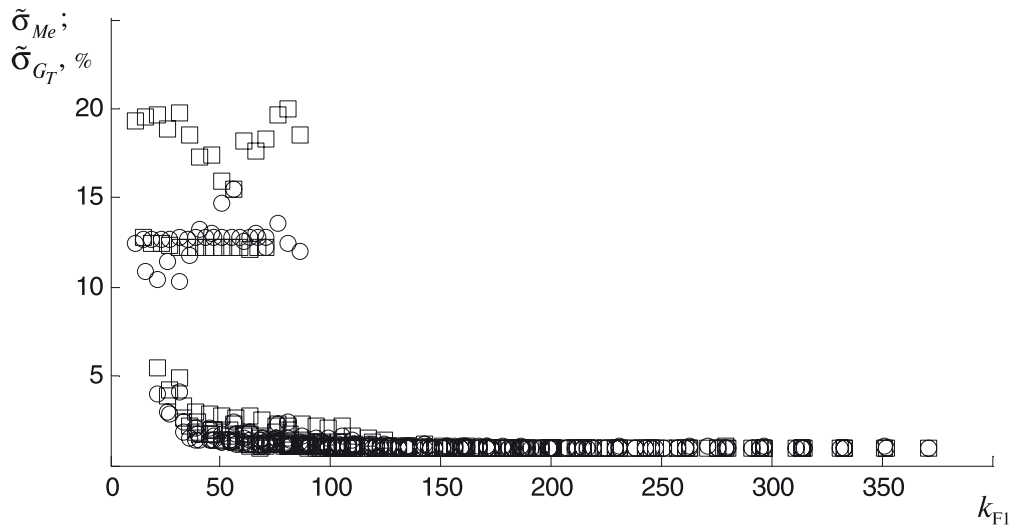


Рис. 1. Зависимость ошибки ИНС, реализующей отображение F_1 , от количества свободных параметров сети k_{F1}
($\square$) – $\tilde{\sigma}_{Me}$; ($\circ$) – $\tilde{\sigma}_{Gr}$

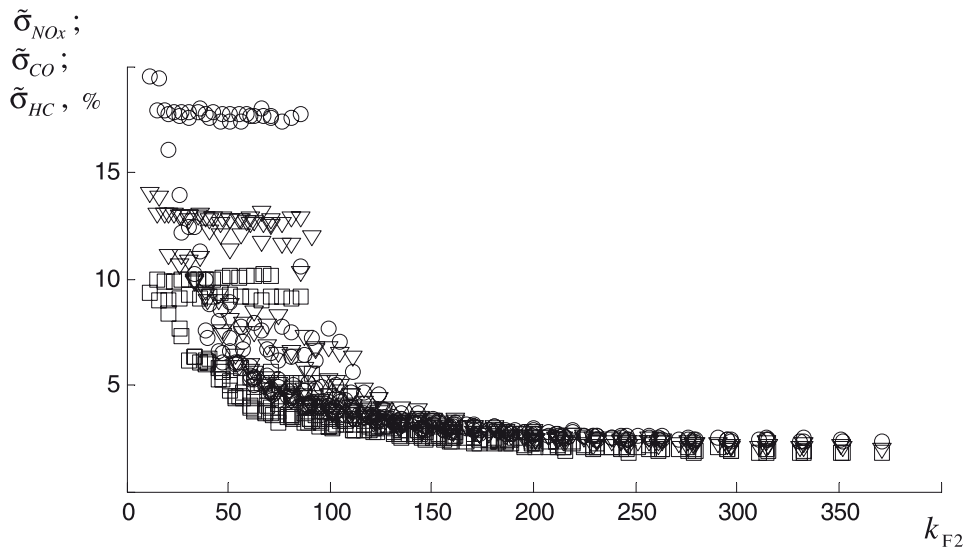


Рис. 2. Зависимость ошибки ИНС, реализующей отображение F_2 , от количества свободных параметров сети
($\square$) – $\tilde{\sigma}_{NOx}$; ($\circ$) – $\tilde{\sigma}_{CO}$; (∇) – $\tilde{\sigma}_{NC}$

На рис. 1 приведены зависимости $\tilde{\sigma}_{Me}$ и $\tilde{\sigma}_{Gr}$ от количества свободных параметров нейронной сети F_1 .

На рис. 2 приведены зависимости среднеквадратических ошибок показателей токсичности ОГ от количества свободных параметров нейронной сети F_2 .

Каждая точка данных зависимостей была получена путем усреднения резуль-

татов десяти экспериментов по обучению нейронных сетей при случайных начальных значениях элементов матриц весовых коэффициентов и векторов смещений нейронов.

Для удобства сравнения среднеквадратические значения ошибок выражены в процентах от максимальных значений соответствующих величин:

$$\tilde{\sigma}_{Me} = \frac{\sigma_{Me}}{\max\{M_e\}} \cdot 100 \%;$$

(22)

$$\tilde{\sigma}_{G_T} = \frac{\sigma_{G_T}}{\max\{G_T\}} \cdot 100 \%.$$

$$\tilde{\sigma}_{NOx} = \frac{\sigma_{NOx}}{\max\{C_{NOx}\}} \cdot 100 \%;$$

$$\tilde{\sigma}_{CO} = \frac{\sigma_{CO}}{\max\{C_{CO}\}} \cdot 100 \%;$$

(23)

$$\tilde{\sigma}_{HC} = \frac{\sigma_{HC}}{\max\{C_{HC}\}} \cdot 100 \%.$$

Анализируя поведение среднеквадратической ошибки при изменении количества свободных параметров нейронной сети F_1 , выберем количество нейронов в первом скрытом слое $k_{11} = 8$, количество нейронов во втором скрытом слое $k_{12} = 4$. Данной структуре соответствует количество свободных параметров $k_{F1} = 70$. Такая нейронная сеть имеет наименьшую сложность, при которой еще можно добиться наименьшей ошибки аппроксимации. Для ИНС F_2

аналогичным образом получим значения $k_{21} = 8$, $k_{22} = 8$, что соответствует величине $k_{F2} = 123$.

Математические ожидания и среднеквадратические отклонения ошибок ИНС F_1 выбранной структуры для контрольного подмножества составили: $M\{M_e\} = 0,061313$ Нм, $M\{G_T\} = 0,00062177$ кг/ч; $\sigma_{Me} = 0,93371$ Нм, $\sigma_{G_T} = 0,13093$ кг/ч.

Соответствующие параметры ошибок ИНС F_2 , полученные на обучающем подмножестве точек, составили: $M\{C_{NOx}\} = 3,4669 \cdot 10^{-5}$ г/ч, $M\{C_{CO}\} = 1,2362 \cdot 10^{-5}$ г/ч, $M\{C_{HC}\} = 3,1023e \cdot 10^{-6}$ г/ч; $\sigma_{NOx} = 0,0046963$ г/ч, $\sigma_{CO} = 0,0013966$ г/ч, $\sigma_{HC} = 0,00066031$ г/ч.

Учитывая, что удельный эффективный расход топлива $g_e = G_T \cdot M_e^{-1} \cdot \omega^{-1}$, на основании аппроксимации скоростных характеристик ДВС нейронной сетью можно получить зависимости $g_e = f(n_{KV}, \beta)$ и $g_e = f(M_e, \beta)$, которые приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Здесь для удобства сравнения результатов моделирования

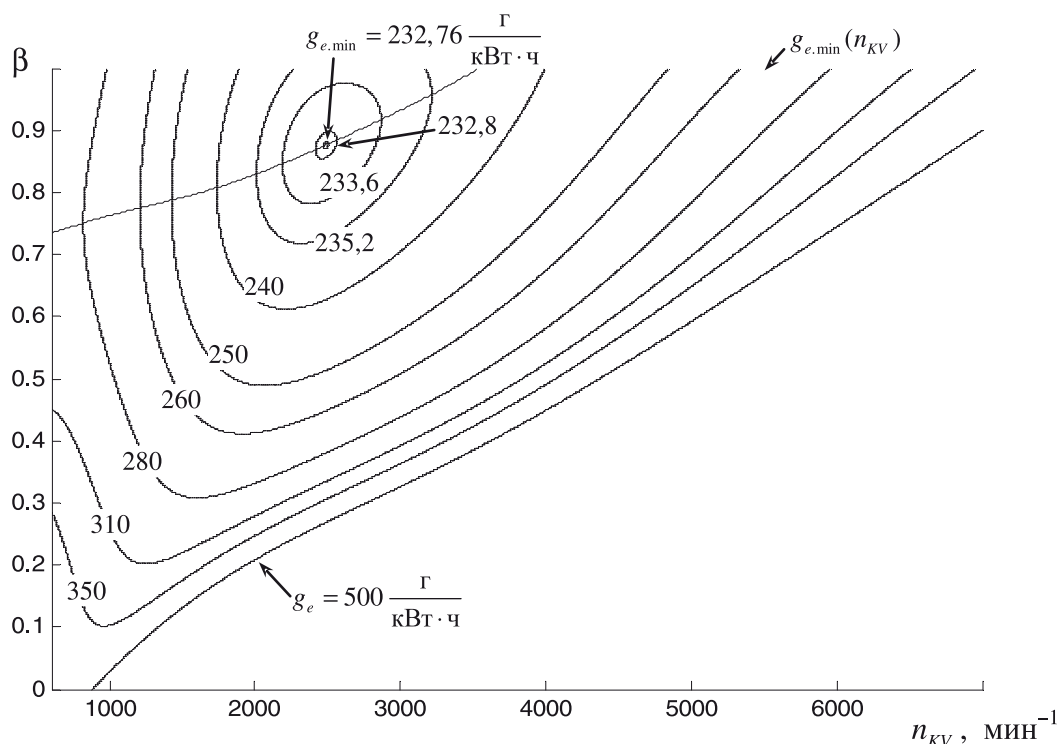


Рис. 3. Зависимость удельного эффективного расхода топлива ДВС от сигнала управления мощностью и скорости вращения КВ

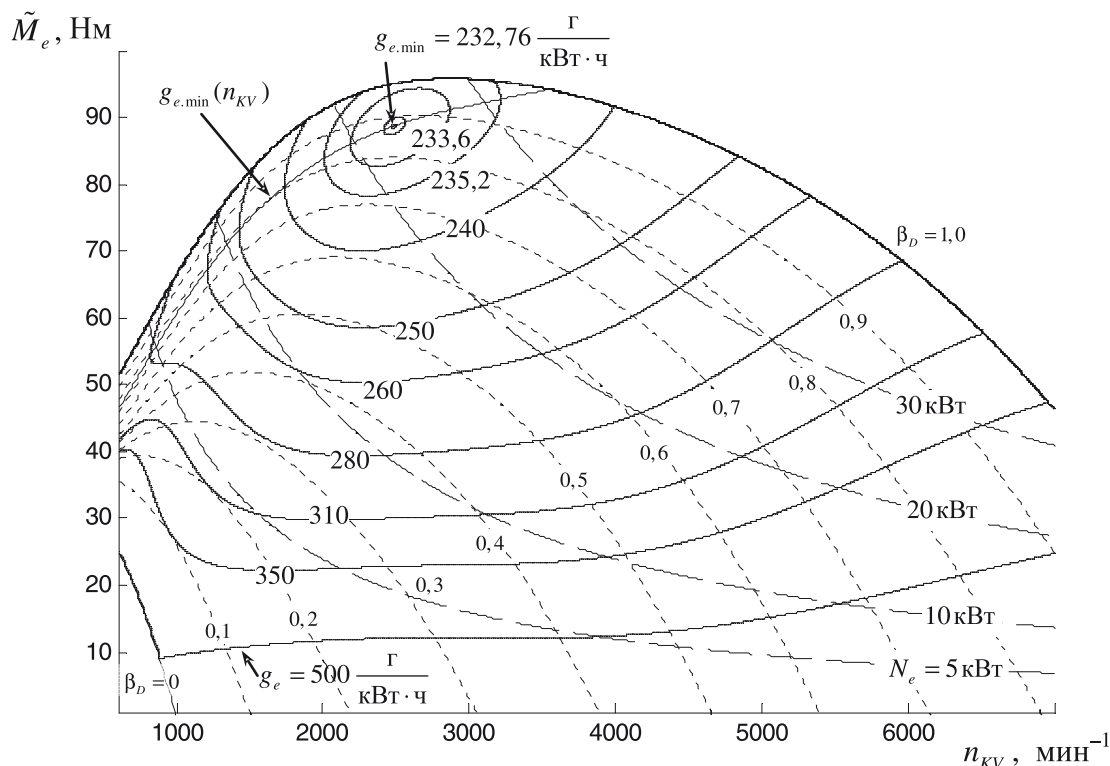


Рис. 4. Зависимость удельного эффективного расхода топлива ДВС от эффективного крутящего момента и скорости вращения КВ

с экспериментальными данными по оси абсцисс отложена частота вращения КВ в мин^{-1} : $n_{KV} = 30 \cdot \omega / \pi$.

Как видно из приведенных многопараметрических характеристик, высокие показатели экономичности работы ДВС могут быть обеспечены только в достаточно узком диапазоне нагрузок и частот вращения КВ. Оптимальный режим работы ДВС соответствует скорости вращения КВ $\omega = 260,62 \text{ рад/с}$ ($n_{KV} = 2490 \text{ мин}^{-1}$) и эффективному крутящему моменту $\tilde{M}_e = 88,94 \text{ Нм}$ ($\beta = 0,88$). При этом удельный эффективный расход топлива составляет $g_{e.\min} = 232,76 \text{ г/кВт}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Использование для согласования режима работы ДВС и тягово-скоростного режима ТС трансмиссии с переменным передаточным отношением от КВ к ведущим колесам оказывается неэффективным при малой мощности сопротивления движению. Так, при $N_e = M_e \cdot \omega = 10 \text{ кВт}$, минималь-

ный удельный эффективный расход топлива при оптимальной скорости вращения КВ составляет около $g_e = 254 \text{ г/кВт}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, что на 9,1 % выше минимального эффективного расхода. При $N_e = 5 \text{ кВт}$ увеличение эффективного расхода топлива на оптимальном скоростном режиме по сравнению с $g_{e.\min}$ составит уже 20,3 %.

Получена математическая модель двигателя внутреннего сгорания на основе аппроксимации его скоростных характеристик и показателей токсичности отработавших газов при помощи искусственных нейронных сетей прямого распространения.

Достоинствами предложенного подхода можно считать простоту настройки модели на конкретный тип двигателя при использовании экспериментально полученных скоростных или нагрузочных характеристик, невысокий уровень сложности с точ-

ки зрения ее использования при решении оптимизационных задач. Математические преобразования, используемые при построении модели, допускают эффективную реализацию средствами системы компьютерной математики MATLAB.

Предложенная математическая модель

может использоваться при разработке систем автоматического управления ДВС и силовых установок гибридных автомобилей, обеспечивающих оптимизацию рабочих процессов двигателя, повышение его топливной экономичности и экологической безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чесноков С.А., Фролов Н.Н., Дунаев В.А., Кузьмина И.В. Моделирование горения и образования токсичных веществ в ДВС с непосредственным впрыском топлива // Двигателестроение. 2005. № 2 (220). С. 12–28.
2. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
3. Наumenко Б.С., Саватеев Р.И. Методы автоматической идентификации информационных параметров силового агрегата автомобиля при испытании на стенде // Сб. науч. трудов СевКавГТУ. 2007. № 3. С. 45–47.
4. Лепешкин А.В., Курмаев Р.Х., Катанаев Н.К. Идентификация работы двигателя самоходной машины для использования в математической модели ее движения (на примере двигателя DT466) // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. № 2(4). С. 68–73.
5. Куделин О.Г., Лебедев О.Н. Решение уравнения вихревого движения вязкости газа в цилиндре ДВС в аналитическом виде // Теплофизика и аэродинамика. Новосибирск: НГАСУ, 2005. Т. 12. № 4. С. 609–614.
6. Сериков С.А., Дзюбенко А.А. Идентификация математической модели двигателя вну-

тренного сгорания с использованием системы нечеткого вывода // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. № 1. С. 14–18.

7. Rajagopalan A., Washington G., Rizzoni G., Guezennec Y. Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advance Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles. Center for Automotive Research. The Ohio State University Columbus, Ohio. Subcontract Report. Dec. 2003.

8. Сериков С.А. Оптимизация управления перераспределением мощности между агрегатами гибридной силовой установки // Автоматика-2008: XV Междунар. конф. по автоматическому управлению. Одесса: ОНМА, 2008. С. 525–528.

9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Под ред. Н.Д. Егупова. Изд. 2-е, стереотип. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.

10. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети. Харьков: ООО «Компания «СМИТ», 2005. 408 с.

11. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1104 с.

12. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 496 с.

REFERENCES

1. Chesnokov S.A., Frolov N.N., Dunayev V.A., Kuzmina I.V. Modelirovaniye goreniya i obrazovaniya toksichnykh veshchestv v DVS s neposredstvennym vpryskom topliva [Imitation of Combustion Process and Generation of Toxic Exhaust Components in Engines with Direct Fuel Injection]. *Dvigatelsestroyeniye [Engines construction]*, 2005, No. 2 (220), Pp. 12–28. (rus)
2. Vyubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I., et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley [Internal combustion engines: theory and combined piston engines]*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1983, 372 p. (rus)
3. Naumenko B.S., Savateyev R.I. Metody

avtomaticheskoy identifikatsii informatsionnykh parametrov silovogo agregata avtomobilya pri ispytanii na stende [Automatic identification information parameters of the power unit of the car during the test on the stand]. *Sbornik nauchnykh trudov SevKavGTU*, 2007, No 3, Pp. 45–47. (rus)

4. Lepeshkin A.V., Kurmayev R.Kh., Katanayev N.K. Identifikatsiya raboty dvigatelya samokhodnoy mashiny dlya ispolzovaniya v matematicheskoy modeli yeye dvizheniya (na primere dvigatelya DT466) [Identification of engine-propelled machines for use in the mathematical model of its motion (for example, DT466 engine)]. *Izvestiya MGTU «MAI»*, 2007, No. 2(4), Pp. 68–73. (rus)

5. Kudelin O.G., Lebedev O.N. Resheniye



uravneniya vikhrevogo dvizheniya vyazkosti gaza v tsilindre DVS v analiticheskom vide [Analytic-form solution of the equation for vortex motion of viscous gas in the ice cylinder]. *Teplofizika i aerodinamika* [Thermophysics and Aeromechanics], Novosibirsk: NGAVT Publ., 2005, Vol. 12, No. 4, Pp. 609–614. (rus)

6. **Serikov S.A., Dzyubenko A.A.** Identifikatsiya matematicheskoy modeli dvigatelya vnutrennego sgoraniya s ispolzovaniyem sistemy nechetkogo vyvoda [The identification of the mathematical model of the internal combustion engine using a fuzzy inference system]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, Kharkov: NTU «KhPI» Publ., 2009, No. 1, Pp. 14–18. (rus)

7. **Rajagopalan A., Washington G., Rizzoni G., Guezennec Y.** *Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advance Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles*. Center for Automotive Research, the Ohio State University Columbus, Ohio. Subcontract Report, Dec. 2003.

8. **Serikov S.A.** Optimizatsiya upravleniya

pereraspredeleniyem moshchnosti mezhdu agregatami gibridnoy silovoy ustanovki [Redistribution of power management optimization between units of the hybrid power plant]. *Avtomatika-2008: XV Mezhdunar. konf. po avtomaticheskomu upravleniyu* [Automation 2008: The XV International Conference on Automatic Control], Odessa: ONMA, 2008, Pp. 525–528. (rus)

9. **Yegupov N.D. ed.** *Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* [Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002, 744 p. (rus)

10. **Rudenko O.G., Bodyanskiy Ye.V.** *Iskusstvennyye neyronnyye seti* [Artificial neural networks]. Kharkov: OOO «Kompaniya «SMIT» Publ., 2005, 408 p. (rus)

11. **Khaykin S.** *Neyronnyye seti: polnyy kurs* [Neural networks: a complete course]. Moscow: ID «Vilyams» Publ., 2006, 1104 p. (rus)

12. **Medvedev V.S., Potemkin V.G.** *Neyronnyye seti. MATLAB 6* [Neural networks. MATLAB 6]. Moscow: Dialog-MIFI Publ., 2002, 496 p. (rus)

СЕРИКОВА Елена Андреевна — доцент кафедры «Автоматы» Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: wdv08@inbox.ru

SERIKOVA Elena A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: wdv08@inbox.ru

СЕРИКОВ Сергей Анатольевич — профессор кафедры мехатроники и робототехники Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: srkv@inbox.ru

SERIKOV Sergey A. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: srkv@inbox.ru

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 4(252) 2016

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 30.12.2016. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,53. Уч.-изд. л. 9,53. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала — 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук — 8–15 страниц формата А-4; аспирантов — 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул — в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт — **TNR**, размер шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева — 3 см, сверху, снизу — 2,5 см, справа — 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru