

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Будякова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)

Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)

Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП
им. Н.А. Пилюгина»

Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)

Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»

Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана

Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)

Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — Мырзина И.Н., Селихова Е.А.

Компьютерная вёрстка — Конова Е.В.

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.

Тел.: 8 (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 75

5
2021

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Сафиул-
лин Р.А. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор
СВЧ-излучения для геологии 195

Кузнецов Е.А., Шавшаев Р.А., Нестеркина Н.П., Журавле-
ва Ю.А. Разработка и исследование светодиодного освети-
тельного прибора с плавным регулированием светового по-
тока 200

Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А., Микаева С.А. Управле-
ние цветностью светотехнического прибора 204

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

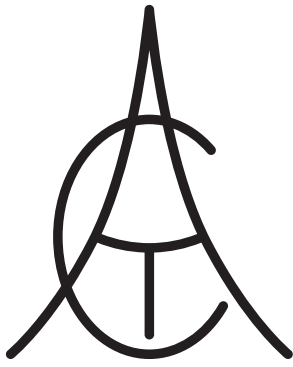
Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Волочкова А.А., Поклад М.Н.
Итерационная формула Ньютона для поиска решения уравне-
ния как абстрактная задача теории модального синтеза 208

Зорченков А.М. Векторизация программного кода 211

Баринин В.А., Курилов В.Б., Павленко О.В. Обтекание
осесимметричной мотогондолы с центральным телом и дрос-
сельными шайбами внутри канала 219

Оболенский Ю.Г., Крошкина А.А. Способ повышения точ-
ности системы стабилизации нормальной перегрузки 227

Сазонова Т.В., Шелагурова М.С., Корнева Е.Г. Исследо-
вание режима экстремальной коррекции по полю рельефа ме-
тодом математического моделирования с использованием
результатов лётных испытаний 231



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

EDITORIAL COUNCIL:

- Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MIREA—RTU
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman
Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI
Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie»
Publishers» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative
Mashinostroenie» Publishers»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician of RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China
Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014
(PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications
approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the
Russian Ministry of education and science for publication of the
works of applicants for academic degrees and the system of the
Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 75 $\frac{5}{2021}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Ismagilov F.R., Yangirov I.F., Maksudov D.V., Safiullin R.A.
Double-stranded magneto-cumulative microwave generator for
geology 195

**Kyznetsov E.A., Shavshaev R.A., Nesterkina N.P., Zhurav-
leva Yu.A.** Development and research of LED lighting device with
smooth regulation of luminous flux 200

Kovalenko O.Yu., Zhuravleva Yu.A., Mikaeva S.A. Apparatus
chromaticity control 204

MODERN TECHNOLOGIES

Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Volochkova A.A., Poklad M.N.
Newton's iterative formula for finding an equation solution as an
abstract problem of the modal synthesis theory 208

Zorchenkov A.M. Vectorization of program code 211

Barinov V.A., Kurilov V.B., Pavlenko O.V. Flow of the axisym-
metric motogondola with a central body and throttling washers in-
side the channel 219

Obolenskiy Yu.G., Kroshkina A.A. Method for improving the
accuracy of the normal overload stabilization system 227

Sazonova T.V., Shelagurova M.S., Korneva E.G. Investigation of
the extreme correction mode along the relief field by the method of
mathematical modeling by using the results of flight tests 231



УДК 621.313.12+621.314.571

Ф.Р. Исмагилов, д-р техн. наук, проф., **И.Ф. Янгиров**, канд. техн. наук,
Д.В. Максудов, канд. техн. наук, **Р.А. Сафиуллин**, канд. физ.-мат. наук
(Уфимский государственный авиационный технический университет,
Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета)

yangirov@yandex.ru

ДВУХСПИРАЛЬНЫЙ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫЙ ГЕНЕРАТОР СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГЕОЛОГИИ

В настоящее время являются актуальными проблемы создания надёжных в эксплуатации и высокоточных устройств для геологических исследований и геолого-разведочных работ, проблемы поиска, разведки и освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана, разведочного бурения. В статье предлагается оригинальная конструкция двухспирального магнитокумулятивного генератора СВЧ-излучения для геологии, создана его математическая модель и выведены расчётные соотношения для практического использования.

Ключевые слова: лайнер; двухспиральная катушка соленоида; ёмкостная связь; колебательный процесс.

Currently, the problems of creating reliable in operation and high-precision devices for geological research and geological exploration works, problems of search, prospecting and development of mineral resources of the World Ocean deep-water regions, exploratory boring are relevant. The article proposes an original design of a double-spiral magneto-cumulative microwave generator for geology, its mathematical model is created, calculated relationships for practical use are received.

Keywords: liner; double-stranded solenoid coil; capacitive communication; oscillatory process.

Введение. В настоящее время в геологии, в том числе в области геолого-разведочных исследований, актуальными являются создание оригинальной, надёжной и высокоточной конструкции высокоэффективного взрывомагнитного (магнитокумулятивного) генератора, разработка его математической модели и проведение экспериментальных исследований в данном направлении для дальнейших практических полевых работ. В статье предлагается оригинальная конструкция взрывомагнитного генератора, разработана математическая модель, принципиально отличающаяся от ранее созданной и рекомендованной [1–4]. Схема генератора приведена на рис. 1. Его основными элементами являются соленоиды 2 и металлический тонкостенный полый конус (лайнер) 1 с зарядом взрывчатого вещества 4. Лайнер представляет собой цилиндрическую или коническую трубу, изготовленную из высокопластичного сплава алюминия или меди. Толщина лайнера рассчитывается из условия обеспечения заданных скорости и угла приближения поверхности лайнера к соленоиду,

а также из условия его механической прочности. Лайнер монтируется внутри соленоида, вдоль его оси. При срабатывании заряда взрывчатого вещества 4 лайнер расширяется

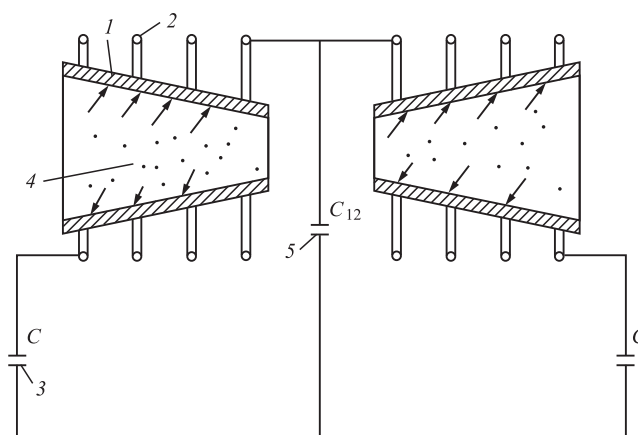


Рис. 1. Схема двухспирального магнитокумулятивного генератора:

1 — лайнер; 2 — соленоид; 3 — вал пружинного привода; 4 — заряд взрывчатого вещества; 5 — цилиндрическая пружина для механического привода магнитопровода

и совершает механическую работу по сжатию магнитного потока соленоида, при этом часть этой работы преобразуется в электромагнитную энергию. Кроме этого, расширяющийся лайнер последовательно замыкает витки соленоида, уменьшая его индуктивность и, соответственно, увеличивая собственную частоту электрической цепи генератора.

Режим работы спирального магнитокумулятивного генератора с ёмкостной нагрузкой, в том числе и его СВЧ-излучение, существенным образом зависит от закона изменения индуктивности соленоида.

В последнее время большое внимание стало уделяться исследованиям физических процессов, протекающих в спиральном генераторе, работающем на ёмкостную нагрузку. Конструктивно конденсатор может быть выполнен в виде одного элемента или конденсаторной батареи.

При этом, как указывалось, важную роль в процессе функционирования магнитокумулятивного генератора играет закон изменения индуктивности соленоида. В частности, в соответствии с этим законом будет реализовываться аperiodический или колебательный характер зависимости тока от времени.

Изменение индуктивности определяется шагом намотки соленоида вдоль его оси, углом и скоростью приближения поверхности лайнера к образующей соленоида.

На характер зависимости тока от времени существенно влияет суммарное активное сопротивление магнитокумулятивного генератора с ёмкостной нагрузкой. В работе [5] теоретически и экспериментально показана возможность формирования сверхвысокочастотного радиоизлучения при функционировании спирального магнитокумулятивного генератора (СМКГ) с ёмкостной нагрузкой. При этом было показано, что интенсивность и спектральные характеристики радиочастотного излучения также существенно зависят от закона изменения индуктивности соленоида [3].

Математическое моделирование. В ходе выполнения работы использованы методы теории электрических цепей, магнитного поля, элементы математического анализа и теория электрических колебательных процессов (биения, резонанса и т. д.) в сложных контурах. В результате получено соотношение, определяющее максимальное значение частоты биений между двумя электрическими контурами, связанными слабой ёмкостной связью, дающее возможность проведения рас-

чётов, необходимых при создании магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и его регулировании [2].

При разработке приведенной в статье математической модели использованы работы [2, 5] по спиральным преобразователям.

Колебательные процессы, протекающие в отдельных частях сложных систем, как правило, взаимосвязаны. Поэтому представляет интерес достаточно простой и наглядный пример генерации колебательных процессов в таких системах. Рассмотрим колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой ёмкостной связью C_{12} , одинаковыми ёмкостями C и индуктивностями L (рис. 2). Аналогом этого процесса является колебательный процесс в механической системе, состоящей из двух математических маятников одинаковой длины, связанных пружиной с небольшим коэффициентом жёсткости [4].

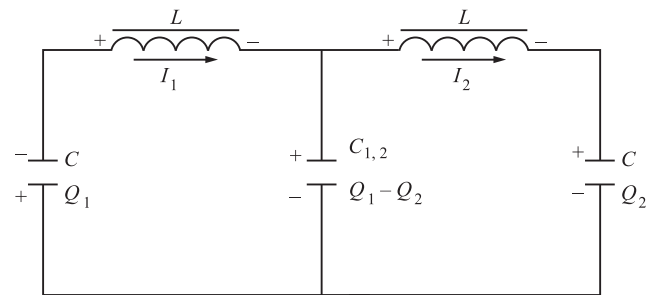


Рис. 2. Электрическая схема замещения магнитокумулятивного генератора

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для первого и второго электрических контуров справедливы соотношения [6]

$$L \frac{dI_1}{dt} + \frac{Q_1}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}} = 0, \quad (1)$$

$$L \frac{dI_2}{dt} + \frac{Q_2}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}} = 0. \quad (2)$$

Поскольку $I_1 = \frac{dQ_1}{dt}$ и $I_2 = \frac{dQ_2}{dt}$, уравнения (1) и (2) можно представить в виде

$$L \frac{d^2Q_1}{dt^2} = -\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2 - Q_1}{C_{12}}, \quad (3)$$

$$L \frac{d^2Q_2}{dt^2} = -\frac{Q_2}{C} + \frac{Q_1 - Q_2}{C_{12}}. \quad (4)$$

После преобразования в соответствии с [7] уравнения (3) и (4) приобретают вид

$$L \frac{d^2(Q_1 + Q_2)}{dt^2} = -\frac{Q_1 + Q_2}{C_{12}}, \quad (5)$$

$$L \frac{d^2(Q_1 - Q_2)}{dt^2} = -\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{C_{12}}\right)(Q_1 - Q_2). \quad (6)$$

Результатом решения уравнений (5) и (6) являются выражения [2]

$$Q_1 + Q_2 = (Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t, \quad (7)$$

$$Q_1 - Q_2 = (Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t, \quad (8)$$

где Q_{10} и Q_{20} — заряды для времени $t = 0$ на ёмкостях первого и второго контуров соответственно.

Частота $\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ соответствует частоте свободных электрических колебаний в контуре, состоящем из ёмкости C и индуктивности L , причём

$$\omega^+ = \sqrt{\frac{1}{LC}} < \omega^- = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_{12}} \right)}.$$

Анализ уравнений (7) и (8) показывает, что как сумма $Q_1 + Q_2$, так и разность $Q_1 - Q_2$ зарядов на ёмкостях C первого и второго контуров изменяются во времени по закону косинуса с постоянными амплитудами $Q_{10} + Q_{20}$ и $Q_{10} - Q_{20}$ соответственно.

Арифметическое сложение и вычитание уравнений (7) и (8) позволяют установить характер изменения во времени зарядов на ёмкостях C_1 и C_2 первого и второго контуров. При этом

$$Q_1 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t + \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t, \quad (9)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20}) \cos \omega^+ t - \frac{1}{2}(Q_{10} - Q_{20}) \cos \omega^- t. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) следует, что в случае равенства начальных зарядов Q_{10} и Q_{20} на ёмкостях C первого и второго контуров текут одинаково направленные токи I_1 и I_2 с постоянной амплитудой $\frac{1}{2}(Q_{10} + Q_{20})$ и угловой частотой ω^+ и в обоих контурах происходят синфазные колебания величины заряда Q . Если же заряды Q_{10} и Q_{20} в начальный момент времени одинаковы по величине, но имеют противоположный знак, т. е. $Q_{10} = -Q_{20}$, то в первом и втором контурах происходят антифазные колебания величин зарядов Q_1 и Q_2 ,

они одинаковы по величине, но противоположны по знаку.

Из изложенного следует, что при синфазных и антифазных колебаниях амплитудные значения зарядов на ёмкостях C остаются постоянными, что соответствует нормальным модам колебаний системы связанных осцилляторов.

Произвольный колебательный процесс в двух электрических контурах со слабой ёмкостной связью можно рассматривать как суперпозицию двух нормальных мод колебаний. Данное утверждение может быть рассмотрено для момента времени $t = 0$, когда заряд на ёмкости C во втором контуре равен нулю: $Q_{20} = 0$. Тогда колебания зарядов Q_1 и Q_2 на ёмкости C в первом и втором контурах, являющиеся нормальными модами колебаний, описываются уравнениями

$$Q_1 = \frac{1}{2} Q_{10} (\cos \omega^+ t + \cos \omega^- t), \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} Q_{10} (\cos \omega^+ t - \cos \omega^- t). \quad (12)$$

Преобразование правых частей уравнений (11) и (12) с помощью известных тригонометрических соотношений позволяет получить выражения

$$Q_1 = Q_{10} \left[\cos \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \right] \left[\cos \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \right], \quad (13)$$

$$Q_2 = Q_{10} \left[\sin \frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t \right] \left[\sin \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)t \right], \quad (14)$$

описывающие периодические колебательные процессы, протекающие с угловой частотой $\omega = \frac{1}{2}(\omega^+ + \omega^-)$ и быстро изменяющейся во времени амплитудой и известные как биения [2].

Возникновение биений в рассмотренном выше случае имеет следующую природу. Чётная мода колебаний зарядов на ёмкостях C в первом и втором контурах соответствует синфазным колебаниям с угловой частотой ω^+ . При этом ёмкость C_{12} не заряжена и колебания зарядов Q_1 и Q_2 аналогичны свободным колебаниям зарядов на ёмкости в замкнутом электрическом контуре, состоящем из ёмкости C и индуктивности L . Нечётная мода колебаний зарядов Q_1 и Q_2 на ёмкостях C в первом и втором контурах соответствует антифазным колебаниям с частотой ω^- , которая несколько больше частоты ω^+ , что объясняется зарядённостью ёмкости C_{12} при антифазных колебаниях.

Наложение чётной и нечётной мод колебаний есть фактически суперпозиция колебаний с близкими угловыми частотами, результатом чего являются биения.

В рассматриваемом случае в силу того, что в начальный момент времени $t = 0$ ёмкость C во втором контуре не заряжена, синфазные и антифазные колебания происходят со сдвигом по фазе, равным $\pi/2$. Вследствие этого в тот момент времени, когда заряд на ёмкости C в первом контуре равен нулю, соответствующий заряд на ёмкости C во втором контуре максимален, и наоборот (рис. 3).

С энергетической точки зрения колебательный процесс в двух электрических контурах, связанных слабой ёмкостной связью, при условии, что в момент времени $t = 0$ заряд на ёмкости C в правом контуре равен нулю, протекает следующим образом. Первоначально вся энергия сосредоточена в первом контуре, затем в процессе колебаний происходит перекачка энергии из первого контура через ёмкость C_{12} во второй контур. После того как перекачка энергии завершена, начинается обратный процесс.

Период обмена энергией $t_{обм}$ между первым и вторым контурами может быть найден с помощью формулы

$$\frac{1}{2}(\omega^+ - \omega^-)t_{обм} = \pi, \tag{15}$$

откуда

$$t_{обм} = \frac{2\pi}{\omega^+ - \omega^-}. \tag{16}$$

Угловая частота обменного процесса, равная угловой частоте биений,

$$\omega_{обм} = \frac{2\pi}{t_{обм}} = \omega^+ - \omega^-. \tag{17}$$

Поскольку описанная выше математическая модель применима в случае слабой ёмкостной связи между электрическими контурами, то с учетом неравенства $C/C_{12} \ll 1$ можно записать следующее выражение для частоты обменного процесса:

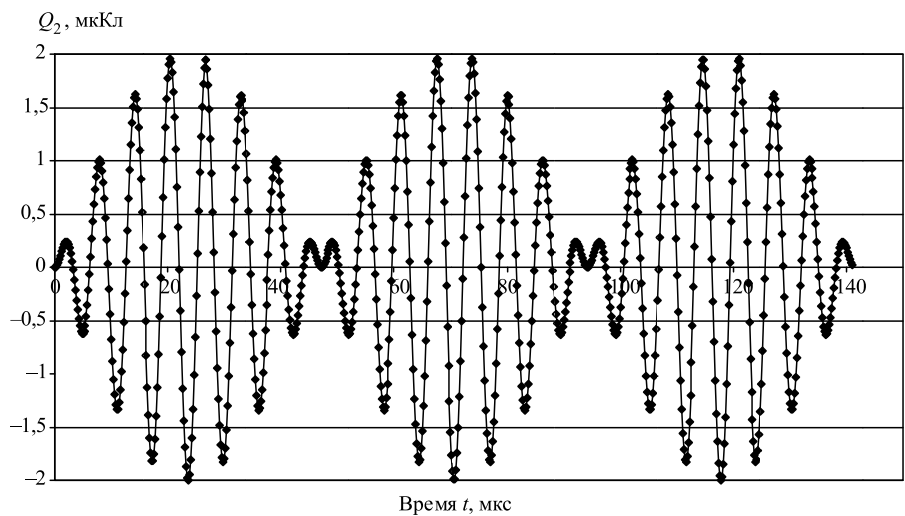


Рис. 3. Оциллограмма работы (биение) СМКГ

$$\begin{aligned} \omega_{обм} &= \sqrt{\frac{1}{LC}} - \sqrt{\frac{1}{L\left(\frac{1}{C} + \frac{2}{LC_{12}}\right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{2C}{C_{12}} + \left(\frac{C}{C_{12}}\right)^2} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{1}{LC}} \frac{C}{C_{12}} = \frac{C}{C_{12}} \omega. \end{aligned}$$

Из последнего уравнения следует, что между частотой обменного процесса, т. е. угловой частотой биения в системе, состоящей из двух электрических контуров, связанных слабой ёмкостной связью, и угловой частотой свободных колебаний в контуре, состоящем из ёмкости C и индуктивности L , существует простая связь. Таким образом, изменяя величины L , C и C_{12} между двумя электрическими конту-

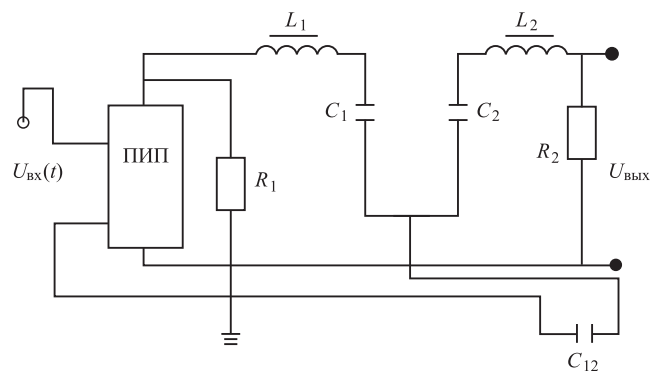


Рис. 4. Электрическая схема подключения генераторов: R_1, R_2 — настроечные сопротивления; $U_{вх}, U_{вых}$ — входное и выходное напряжения системы возбуждения биения; ПИП — повышающий источник питания

рами, связанными слабой ёмкостной связью, можно добиться максимального значения частоты биения $\omega_{\text{обм}} = \omega$, что является важной практической задачей (в геологии, нефтегазовой промышленности и т. д.) [8].

Схема подключения генераторов приведена на рис. 4.

Экспериментальная часть. На рис. 5 приведены огибающие (сплошные линии) экспериментальных осциллограмм производных тока I по времени t для двух вариантов исполнения СМКГ, работающих на ёмкостную нагрузку. Производная тока выбрана как величина, характеризующая процессы в генераторе и наиболее часто измеряемая в подобных экспериментах. Производная тока и время на рис. 5 представлены в безразмерном виде.

СМКГ обоих вариантов имели одинаковые конструкции и геометрические параметры соленоида. Оба варианта генератора содержали соленоид диаметром 90 мм и имели по 9 витков изолированного провода. Варианты различались только толщиной изоляции провода

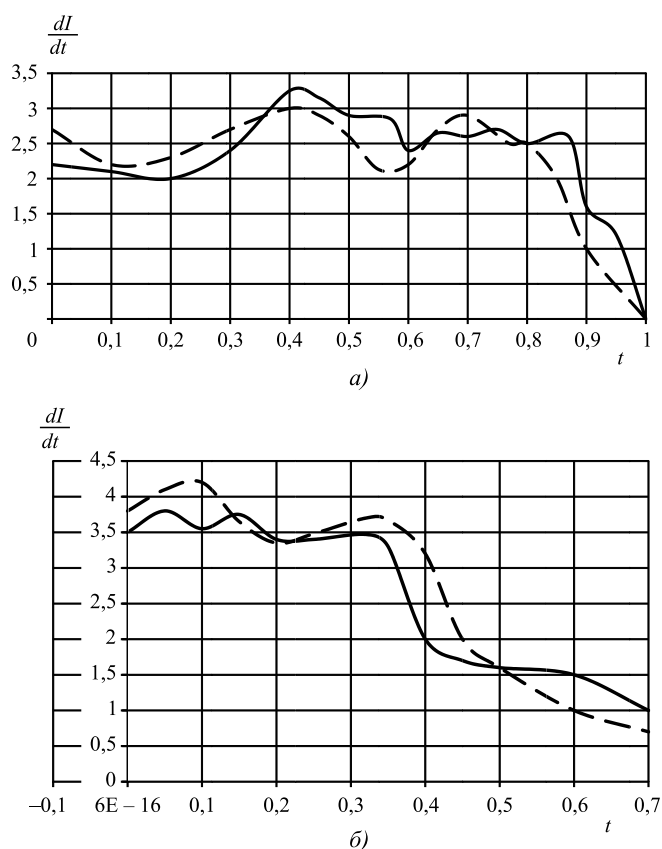


Рис. 5. Зависимость амплитуды производной тока по времени от времени работы генераторов первого (а) и второго (б) вариантов:

— теоретическая кривая; --- экспериментальная кривая

соленоида и начальным напряжением зарядки конденсатора. Фторопластовая изоляция в генераторе первого варианта пробивалась в среднем при импульсном (время действия порядка микросекунды) напряжении 3500 В. Фторопластовая изоляция в генераторе второго варианта пробивалась при импульсном напряжении 28 000 В. В начальный момент времени конденсатор генератора первого варианта был заряжен до напряжения 16 000 В, а конденсатор генератора второго варианта до напряжения 30 000 В. На рис. 5 приведены огибающие (пунктирные линии) зависимости производной тока от времени, рассчитанные по изложенной в статье методике.

Из сравнения расчётных и экспериментальных огибающих видно, что предложенная математическая модель качественно правильно описывает процесс в реальном генераторе. Отличие экспериментальной огибающей осциллограммы производной тока от теоретической на конечном участке зависимости амплитуды производной тока от времени для генераторов первого и второго вариантов может быть объяснено наличием массивного фланца, к которому крепятся лайнер и соленоид. Наличие близко расположенного фланца способно исказить картину замыкания последних витков соленоида. Следует отметить, что использование математической модели, аналогичной рассмотренной в настоящей статье, но не учитывающей наличие электрической изоляции проводов, даёт огибающую производной тока, имеющую не более одного экстремума, что противоречит наблюдаемой в эксперименте картине. Эта особенность модели, не учитывающей наличие изоляции проводов соленоида, не может быть скомпенсирована введением эмпирических коэффициентов.

Заключение. Разработана оригинальная конструкция магнитокумулятивного генератора с высоким СВЧ-излучением и с возможностью его регулирования. Создана математическая модель данной конструкции, которая на основе принципиально новых концептуальных подходов позволяет вывести аналитические зависимости. Используя эти зависимости и корректируя определённые параметры генератора, можно получить максимальное значение частоты биений $\omega_{\text{обм}} = \omega$, соответствующее частоте СВЧ-излучения.

Данная разработка в перспективе может найти применение в геологии, в том числе в геологоразведочной работе, исследовании Мирового океана, нефтегазовой промышленности и т. д.

Библиографические ссылки

1. Янгиров И.Ф. Датчик перемещений и ускорений // Изобретатели машиностроению. 2002. № 1. С. 1.

2. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Электромеханический преобразователь со спиральной вторичной системой // Электротехника. 1997. № 4. С. 40—43.

3. Янгиров И.Ф. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор с улучшенными характеристиками: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. «Современное состояние естественных и технических наук», г. Москва. 2013 / «Естественные и технические науки» и изд. «Спутник+». С. 68—69.

4. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Волкова Т.А. Электромагнитный магнитокумулятивный генератор // Патент России № 201511270507. 2015. Бюл. № 33.

5. Третьяков Д.В. Влияние изоляции проводов спирального магнитокумулятивного генератора на его функционирование // Электричество. 2001. № 6. С. 49—55.

6. Попов В.П. Основы теорий цепей. М.: Высш. шк., 1985. 495 с.

7. Каланов Х.Х., Носкова А.В., Янгиров И.Ф. Использование современных технологий на производстве и в образовательной системе: материалы Всероссийской заочной науч.-практ. конф. аспирантов, соискателей и молодых учёных / под общ. ред. Р.Р. Канифова. Уфа: УГАТУ, 2016. С. 30.

8. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом // Электротехника. 1994. № 9. С. 12—14.

Ссылка для цитирования

Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Максудов Д.В., Сафиуллин Р.А. Двухспиральный магнитокумулятивный генератор СВЧ-излучения для геологии // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 195—200.

УДК 628.941.8

Е.А. Кузнецов, Р.А. Шавшаев, Н.П. Нестеркина

(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),

Ю.А. Журавлева, канд. техн. наук, доц.

(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

kuzneczov_ea@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СВЕТОВОГО ПОТОКА

Статья посвящена разработке и исследованию светодиодного осветительного прибора с регулируемым световым потоком на основе аналогового протокола управления освещением 1—10 В. Анализ результатов измерений показал, что разработанный светодиодный осветительный прибор имеет номинальный световой поток 5184 лм и потребляемую мощность 51 Вт. Плавное регулирование светового потока светильника в диапазоне 103...5184 лм осуществляется автоматически на основе протокола управления освещением 1—10 В при изменении естественной освещённости от 570 до 0 лк. Разработанный светодиодный светильник имеет высокую световую отдачу, равную 101,65 лм/Вт, что свидетельствует о его высокой световой эффективности.

Ключевые слова: осветительный прибор; мощность; световой поток; световая отдача; спектр излучения; светильник.

The article is devoted to the development and research of an LED lighting device with an adjustable luminous flux based on an analog lighting control protocol of 1—10 V. An analysis of the measurement results showed that the developed LED lighting device has a nominal luminous flux of 5184 lm and a power consumption of 51 W. Smooth regulation of the light luminous flux in the range of 103...5184 lm is carried out automatically based on the 1—10 V lighting control protocol when the natural illumination is changed from 570 to 0 lux. The developed LED lamp has a high luminous efficiency equal to 101.65 lm/W which indicates its high luminous efficiency.

Keywords: lighting device; power; light flow; light output; radiation spectrum; lamp.

Осветительные приборы (ОП) относятся к потребителям электрической энергии массового использования. Исследования показали [1, 2], что применение световых осветительных

приборов, поддерживающих соответствующие стандарты управления освещением, может сократить расходы на освещение общественных и производственных помещений. Таким обра-

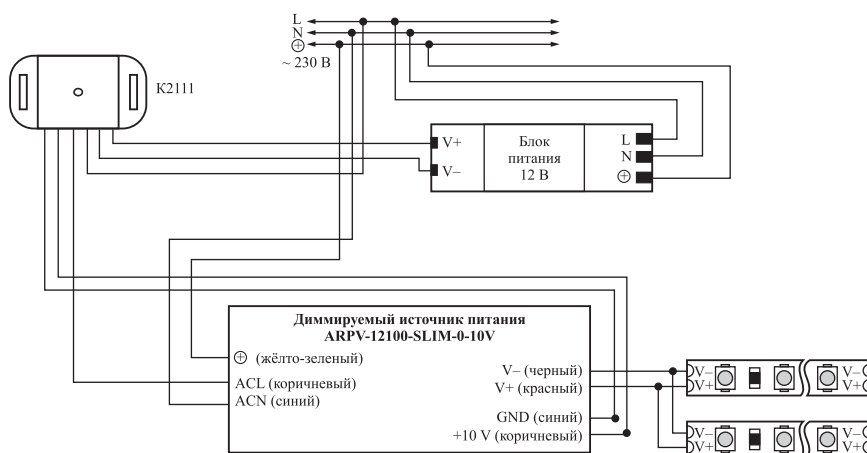


Рис. 1. Электрическая схема подключения электронных компонентов ОП



Рис. 2. Внешний вид разработанного светодиодного ОП

зом, разработка ОП с регулируемым световым потоком является важной задачей.

Цель работы — разработка и исследование светодиодного ОП с регулируемым световым потоком на основе аналогового протокола управления освещением 1—10 В.

Исследование характеристик светодиодного ОП осуществлялось в лаборатории центра коллективного пользования «Светотехническая метрология» (Институт электроники и светотехники МГУ им. Н.П. Огарёва) [3]. Измерения электрических характеристик, энергетического потока и спектра излучения осуществлялись согласно ГОСТам [4, 5] в помещении с неподвижным воздухом при температуре $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, атмосферном давлении 101 кПа и относительной влажности не менее 70 %, в условиях отсутствия дыма и пыли. Измерения проводились при номинальном напряжении сети на фотоколориметрической измерительной установке фирмы Gooch & Housego, содержащей фотометрический шар OL IS7600, многоканальный спектрорадиометр OL 770 UV/VIS, оптоволоконный кабель 770-7G-3.0, прецизионный источник постоянного тока OL410-200 PRECISION LAMP SOURCE (для питания вспомогательной лампы AUX LAMP A180), арматуру (для крепления лампы), компьютер [6].

Для светодиодного ОП были подобраны следующие основные компоненты:

- корпус, выполненный из П-образного алюминиевого профиля с толщиной стенки 5 мм;
- две светодиодные линейки длиной 100 см со светодиодами SMD 5630;

- матовый рассеиватель с коэффициентом пропускания 0,8;

- датчик освещённости K2111;

- источник питания PS15-W1V12 для питания датчика освещённости;

- диммируемый драйвер ARPV-12100-SLIM-0-10V для питания светодиодной линейки.

Схема подключения всех электронных компонентов по протоколу 1—10 В представлена на рис. 1.

На рис. 2 показан внешний вид светодиодного ОП.

На начальном этапе исследования был определён период стабилизации светового потока $\Phi_{\text{св}}$ (рис. 3) и потребляемой мощности ОП P (рис. 4).

Время стабилизации светотехнических параметров светодиодного ОП составило 7 мин. В установившемся режиме световой поток светильника составил 5184 лм, потребляемая мощность — 51 Вт.

Зависимость светового потока светильника от уровня естественной освещённости E на датчике K2111 представлена на рис. 5.

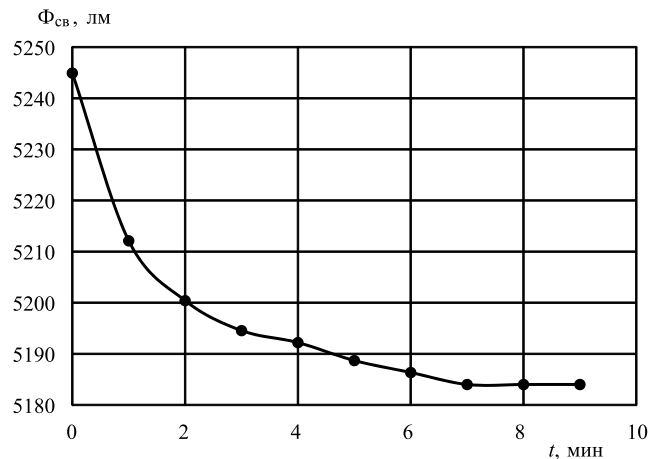


Рис. 3. Изменение светового потока в период стабилизации

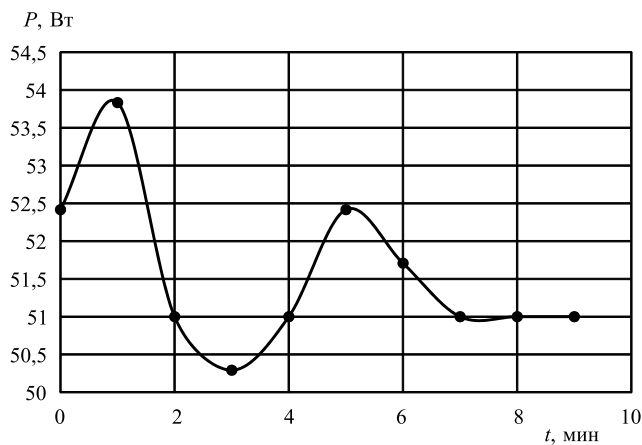


Рис. 4. Изменение мощности в период стабилизации

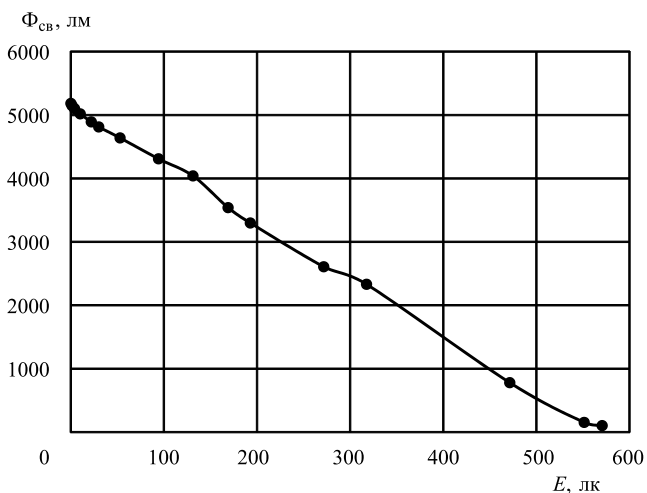


Рис. 5. Зависимость светового потока светильника от уровня естественной освещённости на датчике K2111

Световой поток светодиодного ОП изменяется в диапазоне от 2 до 100 % от максимального значения. Максимальное значение светового потока светильника достигается при полном отсутствии естественной освещённости на датчике, что соответствует напряжению 10 В. В тот период времени, когда уровень естественной освещённости достигает 570 лк, светильник имеет минимальный световой поток, равный 103 лм, а напряжение на датчике составляет 1 В. Таким образом, в диапазоне изменения естественной освещённости от 0 до 570 лк осуществляется автоматическое плавное регулирование светового по-

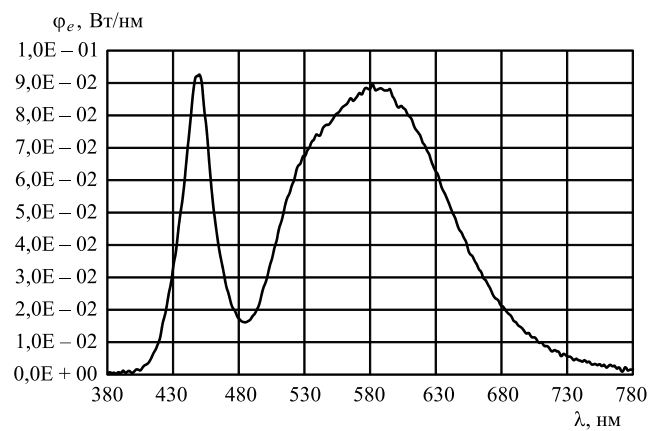


Рис. 6. Распределение спектральной плотности потока излучения:

$\Phi_e(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения;
 λ — длина волны

тока светильника от 5184 до 103 лм согласно протоколу управления освещением 1—10 В.

Спектральное распределение излучения представлено на рис. 6.

Анализ спектральных распределений излучения позволяет сделать следующие выводы:

спектр излучения имеет два максимума в синей (450 нм) и желто-оранжевой (592 нм) областях;

цветовая температура излучения равна 4120 К;

номинальный световой поток светильника составляет 5184 лм;

индекс цветопередачи $R_a = 81,5$.

На рис. 7 представлена кривая силы света (КСС) светодиодного ОП в системе фотометрирования C, γ .

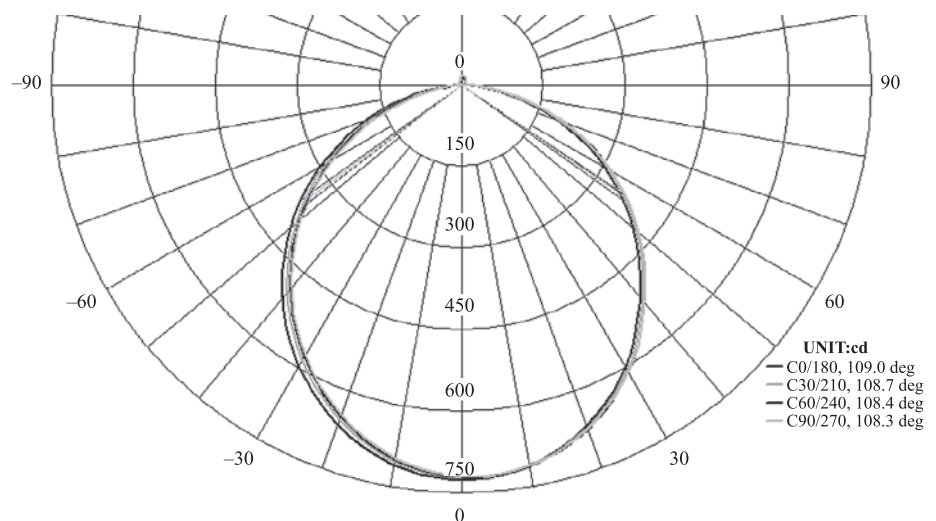


Рис. 7. КСС светодиодного светильника

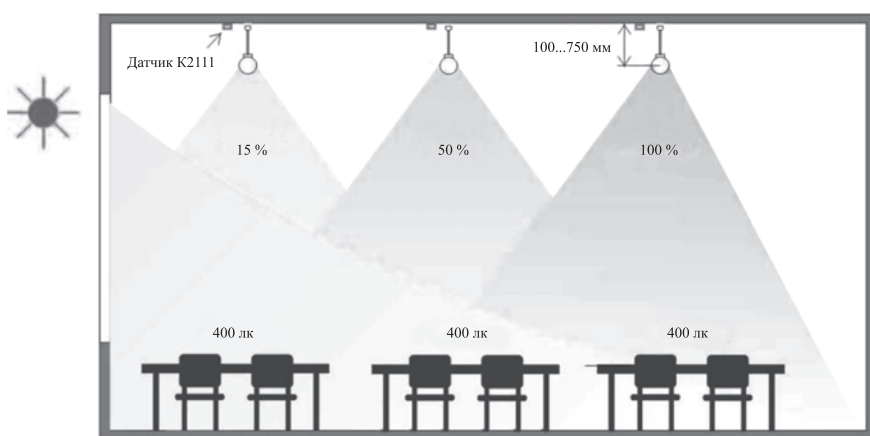


Рис. 8. Пример регулирования освещённости на рабочей поверхности в классных комнатах. Светильники, расположенные ближе к световым проёмам, потребляют меньше электроэнергии при одинаковом уровне освещённости на всех рабочих поверхностях

Максимальная сила света светильника составляет 722,5 кд. По типу светового распределения КСС светильника относится к косинусной, характер которой подходит для создания общего освещения в помещениях.

Светотехнические характеристики разработанного светодиодного ОП

Тип КСС	Косинусная
Световой поток, лм	5184
Мощность, Вт	51
Световая отдача, лм/Вт	101,65
Напряжение питающей сети, В	230
Цветовая температура, К	4120
Индекс цветопередачи R_a	81,5
Время стабилизации параметров, мин	7

Согласно СП 52.13330.2016 [7] разработанный светильник может применяться для общего освещения общественных и производственных помещений, в которых требуется хорошее качество цветопередачи. На рис. 8 представлен пример освещения классной комнаты с использованием разработанного ОП. Поддержание заданной освещённости на рабочей поверхности на расстоянии 0,8 м от уровня пола осуществляется путём автоматического плавного изменения светового потока светильников в зависимости от уровня естественной освещённости в помещении. Если уровня естественной освещённости на рабочей поверхности будет недостаточно, то величина светового потока светильника увеличится, что позволит скорректировать уменьшение естественной освещённости.

Таким образом, разработанный светодиодный ОП имеет номинальный световой поток

5184 лм и потребляемую мощность 51 Вт. Плавное регулирование светового потока светильника в диапазоне от 103 до 5184 лм осуществляется автоматически на основе протокола управления освещением 1—10 В при изменении естественной освещённости от 570 до 0 лк. Разработанный светодиодный ОП имеет высокую световую отдачу, равную 101,65 лм/Вт, что свидетельствует о высокой световой эффективности светильника.

Библиографические ссылки

1. **Атрашенко О.С.** Системы для управления освещением на промышленных предприятиях // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 1. С. 39—43.
2. **Кирич И.Г.** Системы автоматического управления внутренним освещением для освещения мест общего пользования многоквартирных домов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2015. № 1. С. 114—116.
3. **Центр** коллективного пользования научным оборудованием «Светотехническая метрология» [Электронный ресурс]. URL: http://www.mrsu.ru/ru/sci/labs.php?ELEMENT_ID=57865&spphrase_id=1149162 (дата обращения: 20.11.2020).
4. **ГОСТ Р 54350—2015.** Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
5. **ГОСТ Р 55702—2013.** Источники света электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. М.: Стандартинформ, 2014. 43 с.
6. **Микаева С.А., Железникова О.Е., Сеницына Л.В.** Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33—36.
7. **СП 52.13330.2016.** Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. М.: НИИСФ РААСН и ООО «ЦЕРЕРА-ЭКСПЕРТ», 2016. 135 с.

Ссылка для цитирования

Кузнецов Е.А., Шавшаев Р.А., Нестеркина Н.П., Журавлева Ю.А. Разработка и исследование светодиодного осветительного прибора с плавным регулированием светового потока // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 200—203.

УДК 628.93

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-5-204-207

О.Ю. Коваленко, д-р техн. наук., проф.,
(Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва», г. Саранск),

Ю.А. Журавлева, канд. техн. наук, доц., **С.А. Микаева**, д-р техн. наук, проф.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

УПРАВЛЕНИЕ ЦВЕТНОСТЬЮ СВЕТОТЕХНИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Статья посвящена разработке светотехнического прибора с управлением цветностью светодиодной ленты в зависимости от температуры и влажности воздуха. Для разработки макетного образца светотехнической установки использовали микроконтроллер A-Star 32U4 Micro (аналог Arduino Micro) и датчик температуры и влажности DHT11. Микроконтроллер A-Star 32U4 Micro является универсальным программируемым модулем на базе микроконтроллера ATmega32U4 AVR от Microchip (ранее Atmel), который имеет 32 КБ флэш-памяти, 2,5 КБ оперативной памяти и встроенную функциональность USB.

Ключевые слова: оптическое излучение; светодиод; светодиодная лента; светотехнический прибор; цветность; температура; влажность; термистор; датчик; микроконтроллер; микросхема; цифровой сигнал.

The article is devoted to the development of a lighting apparatus with chromaticity control of the LED strip depending on the temperature and humidity. To develop a prototype of a lighting installation, an A-Star 32U4 Micro microcontroller (analogous to ArduinoMicro) and a DHT11 temperature and humidity sensor are used. The A-Star 32U4 Micro microcontroller is a universal programmable module based on the ATmega32U4 AVR microcontroller from Microchip (formerly Atmel) which has 32 KB flash memory, 2.5 KB RAM and built-in USB functionality.

Keywords: optical radiation; light-emitting diode; LED strip; lighting device; chromaticity; temperature; humidity; thermistor; sensor; microcontroller; chip; digital signal.

Рост применения светодиодных приборов и установок является основной тенденцией развития современной светотехники. Потребитель предъявляет к светодиодной (СД) технике различные требования в соответствии с областью их применения. В связи с этим разработчики СД-приборов и установок уделяют внимание таким вопросам, как программный синтез СД-модулей для обеспечения требуемой кривой распределения силы света [1]. Кроме того, важным направлением является создание многокомпонентных СД-приборов, установок и систем, обеспечивающих управление цветностью [2—4].

Цель работы — разработка светотехнического прибора в составе установки, обеспечивающей управление цветностью [5—10].

Была поставлена задача: разработать прибор со светодиодной лентой в составе установки, позволяющей в зависимости от температуры и влажности воздуха изменять цвета RGB-ленты в пределах требуемого спектра.

Для разработки макетного образца светотехнической установки были закуплены микроконтроллер A-Star 32U4 Micro (аналог Arduino Micro), два отрезка RGB-ленты:

5 и 10 см, датчик температуры и влажности DHT11, соединительные провода, корпус.

Предполагается, что при внешней температуре воздуха в диапазоне 0...15 °С лента будет в синих тонах, 16...25 °С — в зеленых и 25...50 °С — в красных. Цвет ленты изменяется также при изменении влажности воздуха.

Схема установки разработанного макетного образца прибора на плате представлена на рис. 1.

Датчик температуры и влажности DHT11 от AOSONG (рис. 2, 3) довольно прост в использовании. Он предварительно откалиброван и не требует дополнительных компонентов.

Датчик температуры и влажности DHT11 имеет следующие характеристики:

диапазон температур DHT11 0...50 °С с точностью $\pm 2^\circ$; диапазон измерения влажности DHT11 20...80 % с точностью 5 %; рабочее напряжение 3...5 В; максимальный рабочий ток 2,5 мА; частота выборки 1 Гц (чтение каждую секунду); размер корпуса 15,5 × 12 × 5,5 мм.

Корпус состоит из двух частей и легко вскрывается. Внутри корпуса, на стороне датчиков, находятся датчик влажности и датчик температуры NTC (термистор).

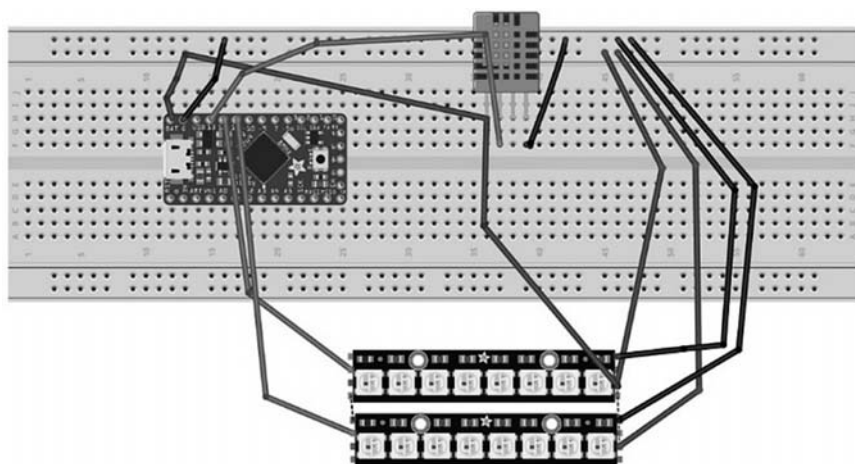


Рис. 1. Схема установки прибора на макетной плате

Компонент, используемый для измерения влажности, имеет два электрода с влагоудерживающей подложкой (обычно соль или проводящий пластиковый полимер), зажатой между ними. По мере поглощения водяного пара подложка высвобождает ионы, что увеличивает проводимость между электродами. Изменение сопротивления между двумя электродами пропорционально относительной влажности. Повышение относительной влажности уменьшает сопротивление между электродами, в то время как её снижение увеличивает это сопротивление.

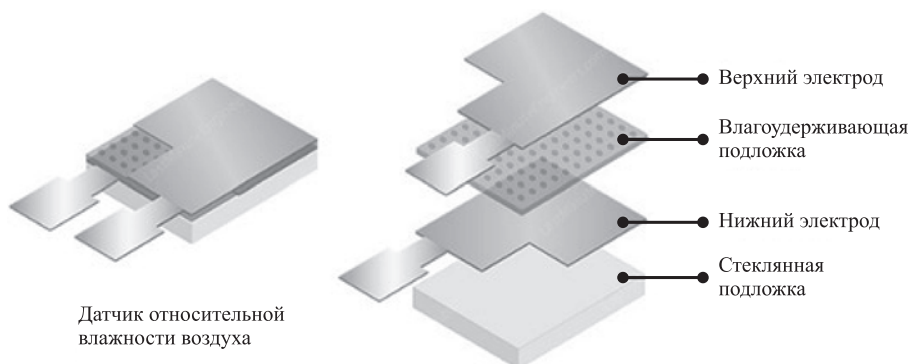


Рис. 3. Структура датчика относительной влажности воздуха

Кроме того, в этих датчиках имеется датчик температуры NTC (термистор). Термистор — это терморезистор — резистор, который изменяет своё сопротивление в зависимости от температуры. С технической точки зрения все резисторы в какой-то степени являются термисторами — их сопротивление изменяется в зависимости от температуры, но обычно это изменение очень мало и его трудно измерить.

Термисторы сделаны так, чтобы их сопротивление резко изменялось при изменении температуры. При изменении температуры на 1 °С изменение сопротивления может составлять 100 Ом и более. Маркировка NTC (Negative Temperature Coefficient — отрицательный температурный коэффициент) означает, что с ростом температуры сопротивление уменьшается (рис. 4).

С другой стороны корпуса прибора имеется небольшая печатная плата с 8-разрядной микросхемой в корпусе SOIC-14. Эта микро-

схема измеряет и обрабатывает аналоговый сигнал с сохранёнными калибровочными коэффициентами, выполняет аналого-цифровое преобразование и выдаёт цифровой сигнал с данными о температуре и влажности.

Распиновка DHT11: датчик имеет четыре входа/выхода (рис. 5):

вывод VCC — обеспечивает питание датчика. Хотя допускается напряжение питания в диапазоне 3,3...5,5 В, рекомендуется питание 5 В. В случае источника питания напряжением 5 В можно держать датчик на расстоянии до 20 м от источника питания. Однако

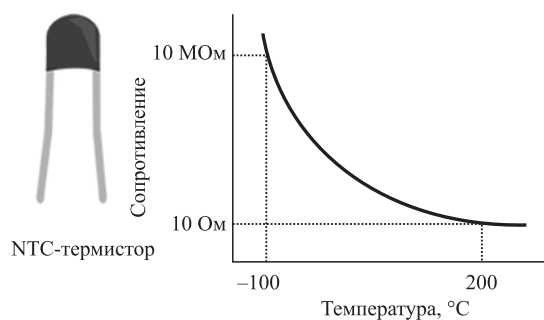


Рис. 4. NTC-термистор

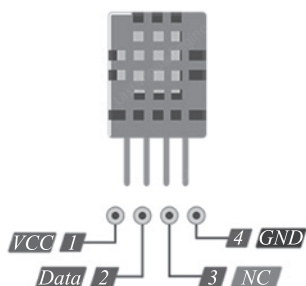


Рис. 5. Распиновка DHT11

при напряжении питания 3,3 В длина кабеля не должна превышать 1 м. В противном случае падение напряжения в линии приведёт к ошибкам измерения;

вывод Data — используется для связи между датчиком и микроконтроллером;

NC — не подключен;

GND — должен быть подключен к земле Arduino.

В разработанной установке, схема которой представлена на рис. 6, используется микроконтроллер A-Star 32U4 Micro. Это универсальный программируемый модуль на базе микроконтроллера ATmega32U4 AVR от

Microchip (ранее Atmel), который имеет 32 КБ флэш-памяти, 2,5 КБ оперативной памяти и встроенную функциональность USB. Бортовые характеристики A-Star (сокращённо A*): наличие резонатора 16 МГц, разъёма USB Micro-B, заголовка внутрисистемного программирования (ISP) и пары индикаторных светодиодов. Регулятор напряжения и схема выбора мощности позволяют питать плату либо от USB, либо от внешнего источника напряжением от 5,5 до 15 В, в то время как сбрасываемый предохранитель PTC на блоке питания USB VBUS и обратная защита на VIN помогают защитить её от случайного повреждения.

В ходе работы были проведены исследования по эксплуатации установки при нормальных условиях (датчики на мониторе персонального компьютера показали температуру около 30° и влажность около 23 %, что соотносится с цветами лент на установке), при низкой и высокой температурах.

В результате проведённой работы был создан прибор со светодиодной лентой в составе установки с микроконтроллером с датчиками

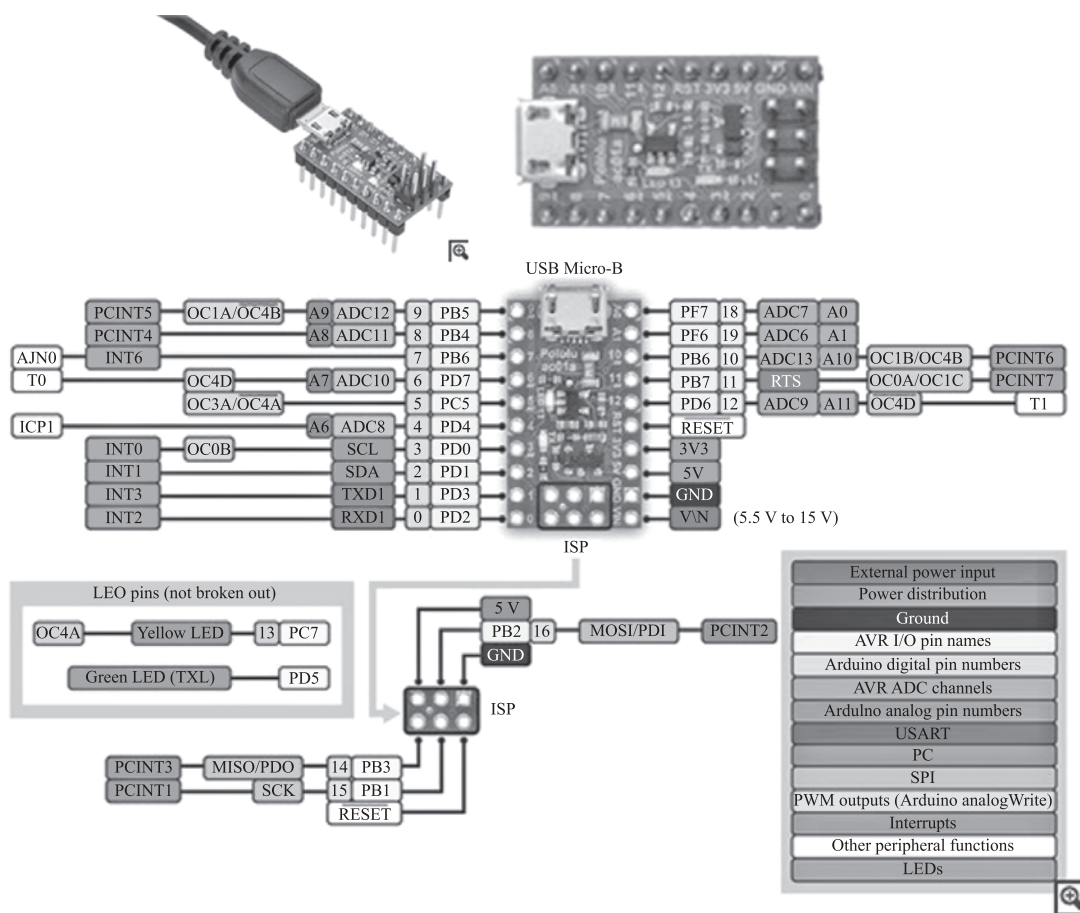


Рис. 6. Схема разработанной установки

температуры и влажности, позволяющей в зависимости от температуры и влажности воздуха изменять цвета RGB-ленты в требуемом спектре.

Библиографические ссылки

1. Коваленко О.Ю., Афонин В.В. Программный синтез светодиодного модуля // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В.П. Горячкина». 2009. № 2 (33). С. 52—54.
2. Коваленко О.Ю., Ашрятов А.А., Медведева А.А., Афонин В.В., Сарычев П.А., Колмакова Е.Д. Световой прибор // Патент России № 118719. 2012. Бюл. № 21.
3. Афонин В.В., Борискина А.А., Коваленко О.Ю. Математическая модель для определения колориметрических характеристик многокомпонентной светодиодной системы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 46.
4. Пильщикова Ю.А., Коваленко О.Ю., Гусева Е.Д., Кудашкина М.В. Моделирование относительной спектральной чувствительности органа зрения биообъекта для оценки эффективности источников излучения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 183—191.
5. Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальные исследования характеристик перспективных

источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.

6. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 135 с.

7. Микаева С.А., Микаева А.С. Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. 186 с.

8. Микаева С.А., Микаева А.С. Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы. М.: Русайнс, 2020. 172 с.

9. Микаева С.А., Брысин А.Н. Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.

10. Брысин А.Н., Микаева С.А. Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.

Ссылка для цитирования

Коваленко О.Ю., Журавлева Ю.А., Микаева С.А. Управление цветностью светотехнического прибора // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 204—207. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-5-204-207.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, проф., **В.Н. Рябченко**, д-р техн. наук, проф.,
А.А. Волочкова, **М.Н. Поклад**, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
nikolay.zubov@rsce.ru

ИТЕРАЦИОННАЯ ФОРМУЛА НЬЮТОНА ДЛЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КАК АБСТРАКТНАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ МОДАЛЬНОГО СИНТЕЗА

Представлен новый подход получения итерационной формулы Ньютона поиска решения уравнения с применением теории модального управления для линейных дискретных систем при решении задач наблюдения или идентификации. В качестве метода модального управления использован декомпозиционный метод, позволяющий получать аналитические решения.

Ключевые слова: итерационная формула Ньютона; численное решение уравнения; декомпозиционный метод модального синтеза; линейная дискретная система.

A new approach to obtain an iterative Newton formula for finding an equation solution, by using modal control theory for linear discrete systems when solving problems of observation or identification is presented. The decomposition method as a modal control method, which allows obtaining analytical solutions, is used.

Keywords: Newton's iterative formula; numerical solution of the equation; decomposition method of modal synthesis; linear discrete system.

Известно [1], что итерационная процедура поиска корня уравнения

$$f(x) = 0 \quad (1)$$

при условии, что x_i — начальное приближение, заключается в вычислении итерации, которая определяется формулой

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}, \quad (2)$$

где $f'(x)$ — производная от функции $f(x)$.

Далее процедура повторяется: x_{i+1} используется для получения x_{i+2} и т. д. до тех пор, пока корень не будет определён с желаемой точностью:

$$f(x_{i+n}) - f(x_{i+n-1}) \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где ε — заданная малая величина.

Получим формулу (2), используя теорию декомпозиционного метода модального управления [2–10]. Для этого будем считать, что уравнение (1) есть не что иное, как абстрактная дискретная модель нашего условного объ-

екта управления. Тогда можно построить условную дискретную модель следующего вида:

$$\mathbf{x}_p^D(\tau + 1) = \mathbf{A}^D \mathbf{x}_p^D(\tau); \quad \mathbf{y}(\tau) = \mathbf{B}_p \mathbf{x}_p^D(\tau). \quad (4)$$

В этой модели вектор \mathbf{x}_p^D представляет собой матрицу вида $(f(x) \ x)^T$; $\tau = 0, 1, 2, \dots, N$ — дискретное время, определяемое на основе введения на отрезке времени поиска решения уравнения равномерной сетки из N интервалов с шагом $h = \Delta\tau/N$. По сути N определяет число итераций, которые необходимо выполнить, чтобы решить поставленную задачу с заданной точностью. Входящие в модель матрицы имеют следующий вид:

$$\mathbf{A}^D = \mathbf{I}_{2 \times 2}; \quad \mathbf{B}_p = (1 \ 0).$$

Из (4) следует, что для $\mathbf{x}^D = (f(x))$

$$\mathbf{x}^D(\tau + 1) = \mathbf{x}^D(\tau). \quad (5)$$

Ведём обозначение $\mathbf{x}_\tau^D = \mathbf{x}$ и представим (5) в следующем виде:

$$\mathbf{x}(\mathbf{x}_\tau) = f(\mathbf{x}_\tau). \quad (6)$$

Построим для системы (4) наблюдатель состояния полного ранга. В общем виде он определяется уравнением [11]

$$\hat{\mathbf{x}}_p^D(\tau+1) = (\mathbf{A}^D - \mathbf{L}_p \mathbf{B}_p) \hat{\mathbf{x}}_p^D(\tau) + \mathbf{L}_p \mathbf{y}(\tau), \quad (7)$$

где \mathbf{L}_p — матрица коэффициентов наблюдателя.

Оценка $\hat{\mathbf{x}}(\hat{\mathbf{x}}_\tau)$ запишется так:

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{f}(\hat{\mathbf{x}}_\tau). \quad (8)$$

Линеаризуем функцию $f(\mathbf{x}_\tau)$ в окрестности $\hat{\mathbf{x}}_\tau$, используя разложение в ряд Тейлора. В результате будем иметь

$$f(\mathbf{x}_\tau) = f(\hat{\mathbf{x}}_\tau) + f'(\hat{\mathbf{x}}_\tau) \tilde{\mathbf{x}}_\tau, \quad (9)$$

где $\tilde{\mathbf{x}}_\tau = \mathbf{x}_\tau - \hat{\mathbf{x}}_\tau$.

Вычислив далее вектор невязок $\tilde{\mathbf{x}}$, получим

$$\tilde{\mathbf{x}}(\tau+1) = f'(\hat{\mathbf{x}}_\tau) \tilde{\mathbf{x}}_\tau(\tau). \quad (10)$$

Объединяя $\tilde{\mathbf{x}}_x$ и $\tilde{\mathbf{x}}_\tau$ в единый вектор и используя выражение (9), с учётом (6) получим дискретную модель уравнения невязок

$$\tilde{\mathbf{x}}_p(\tau+1) = (\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{B}_p) \tilde{\mathbf{x}}_p(\tau), \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_p^D = \begin{pmatrix} 1 & f'(\hat{\mathbf{x}}_\tau) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

При выполнении условий полной наблюдаемости по Калману:

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{C}_p \\ \mathbf{C}_p \mathbf{A}_p^D \end{pmatrix} = 1 + 1,$$

где \mathbf{C}_p — матрица наблюдаемости, выбором матрицы коэффициентов \mathbf{L}_p при известных матрицах \mathbf{A}_p^D и \mathbf{B}_p всегда можно обеспечить любое заданное размещение на \mathbb{C}^{stab} (в нашем случае это область внутри круга единичного радиуса) корней (полюсов λ) характеристического полинома [12]

$$\det(\lambda \mathbf{I} - (\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p)), \quad (13)$$

где \mathbf{I} — единичная диагональная матрица заданного размера, или собственных значений

$$\begin{aligned} \text{eig}(\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p) = \\ = \{ \lambda_i \in \mathbb{C} : \det(\lambda \mathbf{I}_2 - (\mathbf{A}_p^D - \mathbf{L}_p \mathbf{C}_p)) = 0 \} \end{aligned} \quad (14)$$

наблюдателя состояния. В этом случае нужно рассматривать вспомогательную дискретную систему вида

$$\mathbf{v}(\tau+1) = \mathbf{D}^T \mathbf{v}(\tau) + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\eta}(\tau); \quad \boldsymbol{\eta}(\tau) = -\mathbf{L}_p^T \mathbf{v}(\tau), \quad (15)$$

где \mathbf{v} — вектор, имеющий размерность расширенного вектора \mathbf{x}_p ; $\boldsymbol{\eta}$ — вектор управления; $\mathbf{D}^T = (\mathbf{A}_p^D)^T$; $\mathbf{B}^T = (\mathbf{B}_p)^T$.

Поиск матрицы \mathbf{L}_p относится к классической задаче модального управления, а в нашем случае по сути — цель решения задачи поиска решения исходного уравнения, поскольку идентификация его корня и является решением поставленной нами задачи. В случае выполнения условий полной наблюдаемости необходимые для решения задачи управления матрицы существуют, однако их надо научиться определять. Для решения задачи наблюдения возможно применять любой из методов модального управления [2—11, 13]. Поступим так же, как это сделано в работе [12], и воспользуемся методом, изложенным в работах [1—10]. Введём многоуровневую декомпозицию системы (15), представляемую парой матриц $(\mathbf{D}^T, \mathbf{B}^T)$. Имеем

нулевой (исходный) уровень:

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{D}^T; \quad \mathbf{B}_0 = (\mathbf{B}_p)^T, \quad (16)$$

первый уровень

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_0^\perp \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0^{\perp-}; \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_0^\perp \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0. \quad (17)$$

Здесь \mathbf{B}_0^\perp — аннулятор (делитель нуля) матрицы \mathbf{B}_0 , т. е. $\mathbf{B}_0^\perp \mathbf{B}_0 = 0$; $\mathbf{B}_0^{\perp-}$ — 2 — полуобратная матрица для \mathbf{B}_0^\perp [12], т. е. матрица, удовлетворяющая условиям регулярности

$$\mathbf{B}_0^\perp \mathbf{B}_0^{\perp-} \mathbf{B}_0^\perp = \mathbf{B}_0^\perp; \quad \mathbf{B}_0^{\perp-} \mathbf{B}_0^\perp \mathbf{B}_0^{\perp-} = \mathbf{B}_0^{\perp-}. \quad (18)$$

Тогда в соответствии с работой [12] исконая матрица $\mathbf{L} = \mathbf{L}_0 \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ вычисляется по рекурсивным формулам

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{B}_1^+ \mathbf{A}_1 - \Phi_1 \mathbf{B}_1^+, \quad (19)$$

$$\mathbf{L}_0 = \mathbf{B}_0^- \mathbf{A}_0 - \Phi_0 \mathbf{B}_0^-; \quad \mathbf{B}_0^- = \mathbf{L}_1 \mathbf{B}_0^\perp + \mathbf{B}_0^+ \quad (20)$$

и обеспечивает точное заданное размещение полюсов. Это действительно так, поскольку все элементы множества собственных значений $\text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{B})$ совпадают с собственными значениями заданных устойчивых матриц

Φ_k ($k = 0, 1$), (т. е. собственных значений, лежащих внутри единичного круга).

Подытоживая изложенное, запишем алгоритм решения задачи поиска корня уравнения (1). Он заключается в следующем.

1. С использованием уравнения (1) строятся модели: условная (4) и идентификационная (11).

2. Задаются начальные значения оценок \hat{x}_τ . На их основе в соответствии с (12) определяются оценки вектора состояния x и тем самым формируются начальные условия для разностного дискретного уравнения невязок (11).

5. С помощью метода модального управления [12], определяемого выражениями (16)... (20), решается задача поиска управления вспомогательной системы (15), в результате чего находится транспонированная матрица L_p^T коэффициентов обратной связи наблюдателя.

6. С использованием значений L_p^T на основании (10) находятся новые оценки вектора \hat{x}_τ и далее в соответствии с (11) — новые оценки прогнозируемого корня решения уравнения.

Матрица \hat{A}_p , входящая в уравнение невязок вида (13), будет иметь вид

$$\hat{A}_p = \begin{pmatrix} 1 & b_{11} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Здесь используется обозначение

$$b_{11} = f'(x). \quad (22)$$

Применим изложенный подход (формулы (16)...(22)) к решению задачи идентификации корня решения уравнения.

В соответствии с (16) и на основании (21) имеем

$$A^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ b_{11} & 1 \end{pmatrix}; \quad B^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Для нахождения первого уровня декомпозиции вычислим матрицы-аннуляторы:

$$(B_0)^\perp = (0 \ 1); \quad (B_0)^{\perp-} = (B_0)^{\perp T}.$$

Далее в соответствии с (17) получим

$$A_1 = (1); \quad B_1 = (b_{11}).$$

Чтобы воспользоваться выражениями (19), (20), определим дважды полуобратную матрицу, которая в данном случае будет представлять собой псевдообратную матрицу:

$$B_0^+ = (1 \ 0),$$

и выберем (назначим) матрицы Φ_1, Φ_0 для соответствующих уровней в следующем простом, обеспечивающем максимально быструю сходимость итерационного процесса виде

$$\Phi_1 = (0); \quad \Phi_0 = (0).$$

Тогда в соответствии с (20) получим

$$L_p = \begin{pmatrix} -2 & -\frac{1}{b_{11}} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Используя выражение (23), можно вычислить транспонированную матрицу L_p^T обратных связей наблюдателя. Выделим строку, касающуюся оценивания x . В результате получим

$$L_\tau = -\frac{1}{b_{11}}. \quad (24)$$

Наконец, в соответствии с (10) уравнение оценки корня решения уравнения запишется следующим образом:

$$\hat{x} = L_\tau \tilde{f}, \quad (25)$$

а оценки для следующего такта вычисления относительно предыдущего будут определяться выражением

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_n + L_\tau^T \tilde{f}. \quad (26)$$

С учётом выражения (22) и на основании соотношений (1) и (24) \tilde{f} есть не что иное как $f(x_i)$ и, соответственно, вместо (26) имеем

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)},$$

что и требовалось получить. Представленные в работе результаты показывают, что некоторые аспекты теории модального управления применимы не только к управлению реальными объектами (см. например [2—14]), но и для решения задач абстрактного характера.

Библиографические ссылки

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1978.
2. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Управление конечными собственными значениями дескрипторной системы// Докл. Академии наук. 2015. Т. 460. № 4. С. 381—384.
3. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Пролетарский А.В. Аналитический синтез законов управления боковым движением летательного аппарата// Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 17—23.

4. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Стабилизация взаимосвязанных движений летательного аппарата в каналах тангаж—рысканье при отсутствии информации об угле скольжения // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 95—105.

5. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу продольным движением летательного аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 5. С. 164—175.

6. **Зубов Н.Е., Лапин А.В., Рябченко В.Н.** Аналитический синтез модального регулятора по выходу для управления ориентацией спускаемого аппарата при спуске в атмосфере Земли // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 3. С. 46—59.

7. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром дескрипторной динамической системы // Докл. Академии наук. 2016. Т. 468. № 2. С. 134—136.

8. **Зубов Н.Е.** и др. Синтез законов управления боковым движением летательного аппарата при отсутствии информации об угле скольжения. Аналитическое решение // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 14—20.

9. **Зубов Н.Е., Зыбин Е.Ю., Микрин Е.А.** и др. Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 111—122.

10. **Зубов Н.Е., Лапин А.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром линейной

динамической системы на основе подхода Ван-дер-Воуда // Докл. Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 260—263.

11. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Олейник А.С.** и др. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2014. № 5. С. 3—15.

12. **Зубов Н.Е., Ли М.В., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Терминальное построение орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2017. № 4. С. 154—173.

13. **Zubov N.E., Vorob'eva E.A., Mikrin E.A., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N., Timakov S.N.** Synthesis of Stabilizing Spacecraft Control Based on Generalized Ackermann's Formula // J. of Computer and Systems Sciences International. 2011. Vol. 50. No 1. P. 93—103.

14. **Бронников А.М., Буков В.Н., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н.** Алгебраические особенности динамических систем в виде делителей нуля и их передаточных матриц // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. № 3. С. 28—36.

Ссылка для цитирования

Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Волочкова А.А., Поклад М.Н. Итерационная формула Ньютона для поиска решения уравнения как абстрактная задача теории модального синтеза // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 208—211. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-5-208-211.

УДК 007.896

А.М. Зорченков

(Лаборатория системного программирования, г. Москва)

zorchenkov.alexey@huawei.com

ВЕКТОРИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОДА

Рассмотрено практическое применение методов NLP (Natural Language Processing, обработка естественного языка) к анализу программного кода. Предложена новая методика представления кода в виде числовых векторов на основе технологий машинного обучения.

Ключевые слова: программный код; машинное обучение; прогнозирование.

The practical application of NLP (Natural Language Processing) methods to the analysis of program code is considered. A new technique for representing code in the form of numerical vectors based on machine learning technologies is proposed.

Keywords: program code; machine learning; prediction.

Введение. Важную роль в раскрытии потенциала применения нейронных сетей для анализа естественного языка сыграла модель распределённого представления слов (word2vec) [4, 5], предложений, параграфов и документов (doc2vec) [6]. Методы данной модели создают для объектов изучения векторы

низкой размерности, называемые вкладками. В этих векторах «значение» элемента распределено среди компонент вектора таким образом, что семантически подобным объектам соответствуют близкие друг к другу векторы.

Модель предусматривает автоматическую проверку кода с предложением более подходя-

щих имён функций в случаях несоответствия реализованного разработчиком функционала заданным именам. Такая проверка значительно повышает читаемость, облегчает дальнейшую поддержку кода, а также обуславливает использование доступного кода и программных интерфейсов [1—3].

Поиск и извлечение программных интерфейсов — семантические сходства позволяют искать «в проблемном домене» вместо поиска «в домене решений». Например, разработчик может сфокусироваться на имени метода `serialize`, в то время как более подходящим для данного метода класса может быть `toJson`, поскольку сериализация реализована через интерфейс `json`. Автоматический инструмент, подбирающий вектор и наиболее подходящий к заданному имени среди всех доступных имен, возвратит `toJson` (табл. 1).

Такие семантические подобия довольно сложно найти без предлагаемого подхода. Более того, такой инструмент, использующий век-

торы, рассчитанные в описываемом подходе, может легко определить, что разработчик использует метод `equals` сразу после `toLowerCase`, и предложить использование `equalsIgnoreCase`.

Векторы, рассчитываемые в данном подходе, могут быть использованы как входящие данные в любом конвейере машинного обучения, выполняющего функции извлечения кода, классификации и проставления меток, а также метрики измерения подобия между различными фрагментами кода в целях ранжирования или определения копирования.

Задачей данной работы является нахождение через обучение соответствующих векторов для фрагментов кода. Например, для кода

```
String[] f(final String[] array) {
    final String[] newArray = new String[array.length];
    for (int index = 0; index < array.length; index++) {
        newArray[array.length - index - 1] = array[index];
    }
    return newArray;
}
```

наиболее подходящим наименованием метода будет операция регрессии. В то же время система, работающая на обученных векторах кода, выдаст в порядке убывания значимости подходящие наименования метода (табл. 2).

Продемонстрируем эффективность выбранного подхода к задаче получения наименования метода по его телу. Эта задача важна, поскольку правильно подобранные наименования методов делают код более легко читаемым и поддерживаемым. Подходящее имя метода на высоком уровне выражает краткое резюме о его назначении. В идеале, имея правильное имя метода, уже нет необходимости изучать его внутренний код [20]. Выбор подходящих наименований особенно критичен для методов, являющихся частью публичных API: плохо заданные имена могут обречь проект на нерелевантность [1, 3].

В процессе машинного обучения нахождения векторов кода параллельно рассчитывается словарь векторов меток. При получении имени метода векторы наименований методов показывают удивительные семантические схожести и аналогии. Например, `vector(equals) + vector(toLowerCase)` в результате даёт вектор, наиболее близкий к `vector(equalsIgnoreCase)`. Другие примеры семантических комбинаций имён методов приведены в табл. 3.

Примеры аналогий между именами методов приведены в табл. 4.

Аналогично известному в NLP примеру: $\text{vec}(\text{king}) - \text{vec}(\text{man}) + \text{vec}(\text{woman}) \rightarrow \text{vec}(\text{queen})$

Таблица 1

Семантические подобия наименований методов

A	≈B	A	≈B
size	getSize, length, getCount, getLength	executeQuery	executeSQL, runQuery, getResultSet
active	isActive, setActive	actionPerformed	itemStateChanged, mouseClicked, keyPressed
done	end, stop, terminate	toString	getName, getDescription, getDisplayName
toJson	serialize, toJsonString, toJson, asJson	equal	eq, notEqual, greaterOrEqual, lessOrEqual
run	execute, call, init, start	error	fatalError, warning, warn

Таблица 2

Подходящие имена метода

Наименование	Значимость, %
reverseArray	77,34
reverse	18,18
subArray	1,45
copyArray	0,74

Таблица 3

Семантические комбинации

A	+B	≈C
get	value	getValue
get	instance	getInstance
getRequest	addBody	postRequest
setHeaders	setRequestBody	createHttpPost
remove	add	update
decode	fromBytes	deserialize
encode	toBytes	serialize
equals	toLowerCase	equalsIgnoreCase

Таблица 4

Аналогии между именами методов

A:	B	C:	D
open:	connect	close:	disconnect
key:	keys	value:	values
lower:	toLowerCase	upper:	toUpperCase
down:	onMouseDown	up:	onMouseUp
warning:	getWarningCount	error:	getErrorCount
value:	containsValue	key:	containsKey
start:	activate	end:	deactivate
receive:	download	send:	upload

[21] представленная модель обучается аналогиям, относящимся к программному коду (см. табл. 3).

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в способности создавать векторы, охватывающие свойства фрагментов кода, таким образом, что подобным согласно заданному критерию фрагментам присваиваются близкие друг к другу векторы.

Трудности представления кода и векторы внимания. Присвоение семантической метки фрагменту программного кода (например, имени метода) является примером класса задач, требующих компактного семантического дескриптора этого фрагмента. Главный вопрос — как представить программный код способом, который охватывает семантическую информацию, может быть использован для любых программ и получения таких свойств, как наименование (метка) для кода? Отсюда возникают две основные сложности:

представление кода способом, позволяющим осуществлять обучение на основе программ, написанных на разных языках;

нахождение в процессе обучения тех частей в представлении, которые наиболее важны для предсказания требуемого свойства, и обучение порядку важности этих частей.

Что касается представления, то методы NLP обычно рассматривают текст как последовательность знаков. В действительности, множество существующих подходов также рассматривают программный код как поток символов [14—17, 19]. Однако, как уже было показано в работах [12] и [18], языки программирования могут значительно выиграть при наличии представлений, использующих структурированный характер синтаксиса.

Продолжая исследования, начатые в работах [12] и [13], здесь в качестве представления используются всевозможные пути AST (Abstract Syntax Tree) дерева программного кода. Этот подход позволяет охватить закономерности, свойственные общим шаблонам кода. Кроме того, данное представление значительно снижает затраты на обучение (в сравнении с обучением по тексту программ), сохраняя при этом масштабируемость и обобщаемость так, что может быть применён к различным задачам и большим объёмам программного кода.

Описание модели. Фрагмент кода состоит из набора контекстов, и каждый контекст представляется в виде вектора, значения которого находятся в процессе обучения. Значения вектора охватывают два понятия: семантическое значение контекста и количество внимания, уделяемого данному контексту. Здесь решается проблема агрегации в один вектор огромного количества контекстных векторов. Среди известных ранее подходов использовались выбор либо наиболее важного контекста в качестве результата, либо некоторой взвешенной суммы. В представленном подходе все контекстные векторы используются в процессе обучения для определения веса каждого. Контекстные векторы и глобальный вектор значимости обучаются одновременно с использованием стандартного подхода построения нейронной сети и механизма обратного распространения. По завершении обучения нейронная сеть представляет собой простую математическую функцию, использующую алгебраические методы для определения вектора программного кода для заданного набора контекста.

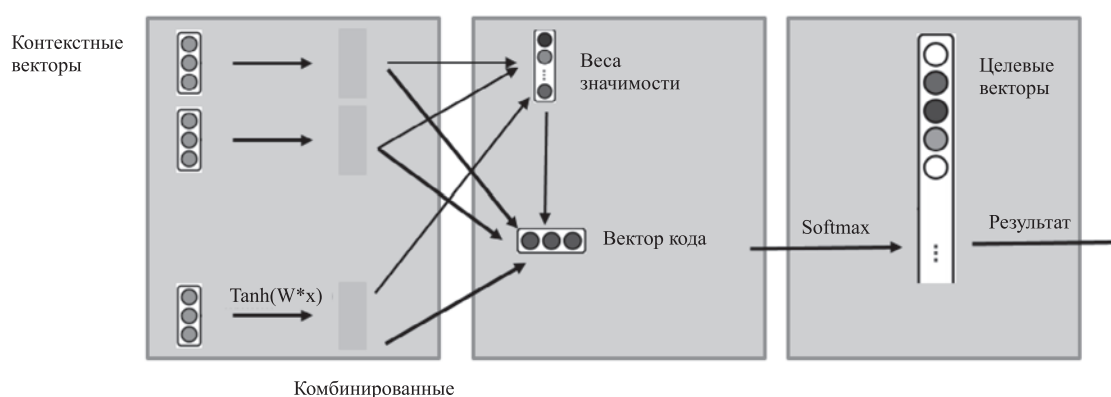


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

На рис. 1 представлена архитектура нейронной сети, основанной на путях между элементами и вектором значимости.

Полностью связанный слой учится сборке векторов контекста с самим собой, векторы значимости находятся обучением с использованием комбинированных векторов контекста и используются для нахождения векторов кода, который используется для нахождения искомого имени функции для данного фрагмента кода.

В процессе обучения используется функция потерь cross-entropy [7] между предсказанным распределением и заданным. Минимизация потерь этой функции эквивалентна максимизации log-вероятности модели выдать метку функции, совпадающую с оригиналом. Процесс обучения нейронной сети использует алгоритм, основанный на градиентном спуске, и стандартный подход обратного распространения ошибки обучения через каждый из обучающихся параметров. После получения ошибок для каждого параметра значение каждого из них изменяется на меньшую величину в сторону минимизации потерь.

Далее обученная нейронная сеть может быть использована как для выполнения очередной независимой задачи, используя вектор кода, так и для предсказания новых меток нового кода. В первом случае новый код может быть передан нейронной сети аналогично тому, как это сделано в процессе обучения, и полученный вектор кода может быть подставлен в следующий этап вычислений: поиск подобных программ, поиск кода, создание предложений по рефакторингу и т. д.

Аналогично получению единственной метки для программного кода предлагаемая модель может быть использована и в множественной разметке [8], когда каждый фрагмент кода содержит несколько меток, как, например, в вопросах StackOverflow.

Проектирование системы. Программный код представлен в виде неупорядоченного пакета путей контекстов. Данный выбор обусловлен гипотезой о том, что существование путей контекстов в теле метода более значимо, чем их внутреннее месторасположение или порядок следования. Как альтернативное решение можно рассмотреть сортировку путей контекстов в соответствии с определённым правилом. Однако, в противоположность естественному языку, нет определённого местоположения в методе, на котором должно быть сосредоточено основное внимание. Самый важный контекстный путь может проявиться в любом месте.

Аналогичному тому, как в работе [4] найдено решение для представления слов, автором проверено, что более простая модель с большим количеством данных гораздо более эффективнее комплексной модели с небольшим набором данных. В более ранних работах [1, 9] предлагалось разложить имена методов на более мелкие субимена и использовался метод непрерывного прогнозирования для составления полного имени. В работе [10] разложены заголовки StackOverflow на отдельные слова и предсказывались слово за словом. В теории такой подход может быть использован для предсказания новых композиций имён, называемых неологизмами [1], не использованных на этапе обучения модели. Однако при масштабировании на миллионы примеров данный подход может стать настолько громоздким, что не сможет пройти обучение из-за аппаратных и временных ограничений.

Другое возможное преимущество метода [9] заключается в возможности получения предсказаний «за пределами словаря» посредством механизма копирования и декодирования субтокенов за субтокеном и предполагает лишь незначительное улучшение. Анализ тестовых данных показывает, что 10 наиболее часто ис-

пользуемых имён функций, таких как `toString`, `hashCode` и `equals`, которые наиболее легко предсказываются, встречаются менее чем в 6 % тестовых примеров. 13 % наименее используемых примеров являются редко используемыми именами, которые наиболее трудно или вообще невозможно предсказать, в том числе с использованием неологизмов и/или механизма копирования. Одним из ярких примеров является имя `imageFormatExceptionShouldProduceNotSuccessOperationResultWithMessage`. Однако после обучения и оценки на том же наборе данных, что и предлагаемая модель, менее 3 % предсказаний подобного рода имён являлись неологизмами либо «за границами словаря». Более того, в большинстве случаев, когда алгоритм [9] рекомендовал неологизм или «за границами словаря», он мог в реальности вернуть более точное предсказание, используя только увиденные ранее на этапе обучения целевые имена функций. Таким образом, доказано, что предсказание целых имён, а не частями, является более практичной задачей.

Другой возможной альтернативой рассматриваемому подходу является метод разложения представления путей на уровень отдельных узлов и обучение представлению целого пути узел за узлом с использованием рекуррентной нейронной сети. Этот подход требует меньше дискового пространства, но в то же время и больше времени на обучение. Статистический анализ данных модели показал, что 95 % всех путей в тестовых данных были уже увиденны системой на этапе обучения. Таким образом, выбор более требовательного к памяти, но более быстрого решения ведёт не более чем к 5 % потерь в точности в сравнении с более продолжительным алгоритмом обучения.

Распределённый и символьные представления кода. Предлагаемая модель использует распределённое представление для программного кода, что является дискретным представлением с использованием векторов и матриц. В распределённых представлениях «значение» элемента распределено по всем компонентам соответствующего ему вектора. Символьное представление, в противоположность распределённому, представляет каждый элемент в виде одной компоненты [11]. В последнее время распределённые представления стали особо популярными в машинном обучении, так как они обобщают лучше, при этом требуя меньше параметров. Модель условно случайных полей CRF (Conditional Random Fields), детально описанная в работах [12] и [13], яв-

ляется одним из примеров модели, использующей символьные представления.

Что касается способности обобщения, то в работах [12] и [13] показано, что CRF является довольно мощным методом предсказания свойств программ. Однако стоит заметить, что он ограничен моделированием только комбинаций значений, увиденных на этапе обучения. Для получения вероятности комбинации значений обученная модель сохраняет скалярное значение для каждого трёх компонент, увиденных на этапе обучения: имя переменной, ещё один идентификатор и связь между ними. В случае если в тестовых данных обнаружена ранее не увиденная комбинация, подобная модель не в состоянии обобщить и оценить вероятность комбинации, даже при условии, что каждое отдельное значение встречалось на этапе обучения. В противоположность этому, распределённые представления могут вычислять вероятность любой комбинации значений. Вместо сохранения параметра для каждой увиденной на этапе обучения комбинации предлагаемая модель сохраняет константу — значение обученных параметров для каждого атомарного значения и использует алгебраические операции для расчёта вероятности их комбинаций.

По сложности обучения использование символьных представлений может потребовать большого количества параметров. В случае предлагаемой модели, рассчитывающей вероятность наименования по заданному набору путей-контекстов, необходимо использовать троичные факторы, которые требуют сохранения параметров для каждой увиденной комбинации четырёх компонент: конечное значение, путь, ещё одно конечное значение и целевую метку программного кода (третичный фактор, определяемый путём с его тремя параметрами). Таким образом, модель CRF характеризуется сложностью хранения данных

$$O(|X^2||P||Y|),$$

где X — набор конечных значений; P — набор путей; Y — набор меток кода.

Напротив, количество параметров в предлагаемой модели оценивается как

$$O(d(|X| + |P| + |Y|)),$$

где d — очень маленькая константа.

Видно, что использование распределённого представления кода позволило перейти от

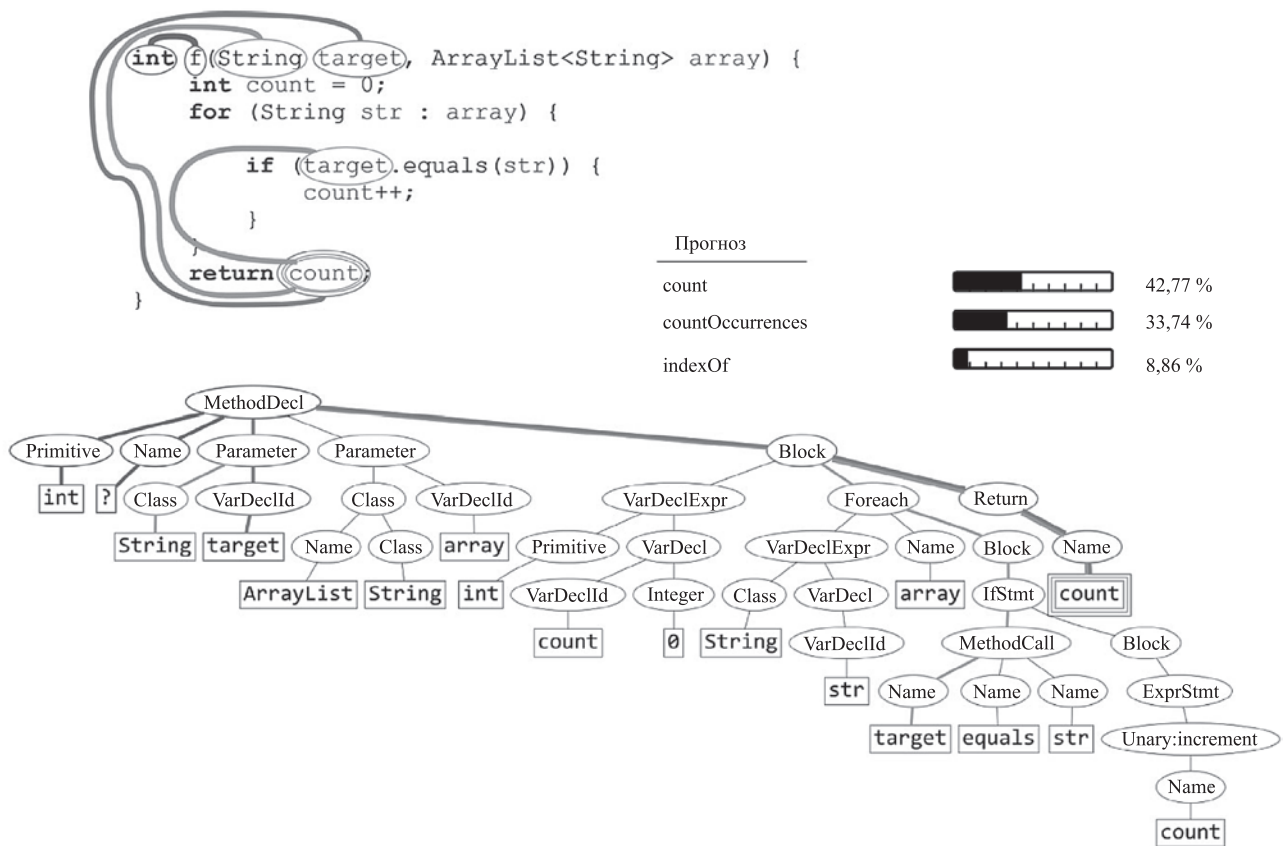


Рис. 3. Пример работы модели на AST-дереве: выделены 4 пути, получивших наибольший вес внимания

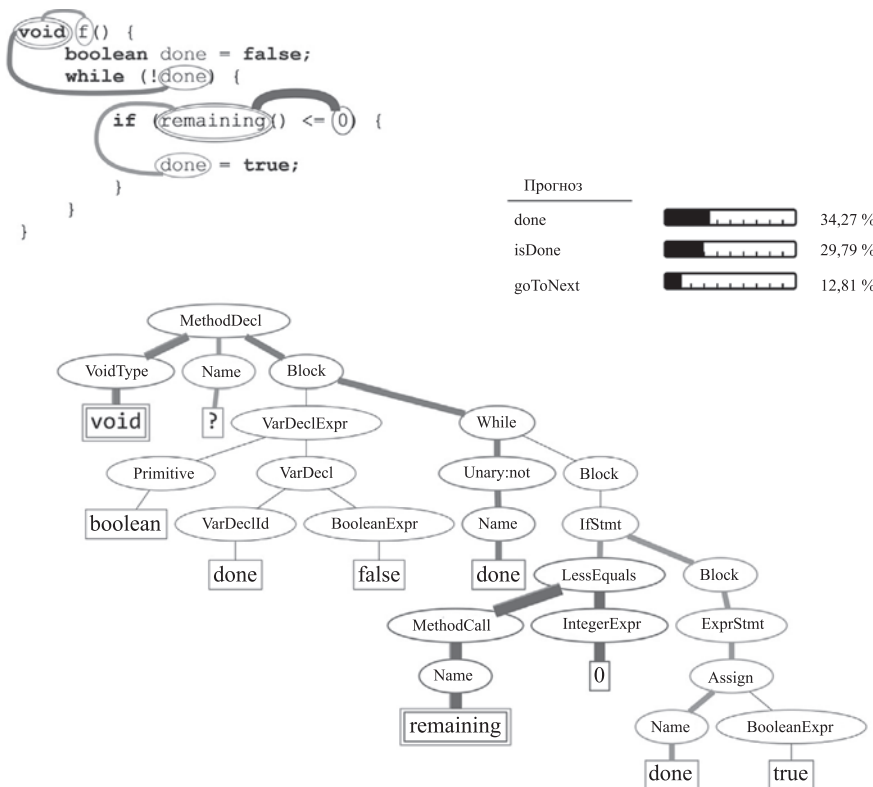


Рис. 4. Пример работы модели на AST-дереве: ширина каждого пути пропорциональна полученному весу внимания

AST-деревя программы кода, и агрегация всех их векторов в единый вектор.

Предложен подход к предсказанию имён методов на основе модели, обученной на более чем 12 млн методах. В противоположность ранее представленным технологиям данная модель прекрасно обобщается и способна предсказывать имена в файлах по совершенно различным проектам. Способность обобщать обусловлена относительной простотой и распределённым характером модели. Благодаря механизму внимания результаты работы модели интерпретируемы и получены интересные наблюдения.

Данная модель, основанная на механизме внимания и использующая структурное представление программного кода, может служить отличной базой для задач обработки кода различных языков программирования.

Библиографические ссылки

1. **Allamanis M., Barr E.T., Bird C., Sutton C.** Suggesting Accurate Method and Class Names / In Proceedings of the 2015. 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering ESEC/FSE 2015, ACM, New York, NY, USA, 2015. P. 38—49. URL: <https://doi.org/10.1145/2786805.2786849> (дата обращения: 15.01.2021).
2. **Fowler M., Beck K.** Refactoring: Improving the Design of Existing Code. Boston, Massachusetts, USA. Addison-Wesley Professional. 1999.
3. **Host E.W., Ostvold B.M.** Debugging Method Names // In Proceedings of the 23rd European Conference on ECOOP 2009 — Object-Oriented Programming (Genoa). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 294—317. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03013-0_14 (дата обращения: 15.01.2021).
4. **Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J.** Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. CoRR abs/1301.3781. 2013. URL: <http://arxiv.org/abs/1301.3781> (дата обращения: 15.01.2021).
5. **Pennington J., Socher R., Manning C.D.** GloVe: Global Vectors for Word Representation // In Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). P. 1532—1543. URL: <http://www.aclweb.org/anthology/D14-1162> (дата обращения: 15.01.2021).
6. **Le Q., Mikolov T.** Distributed Representations of Sentences and Documents // In Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning (ICML-14), Jebara T. and Xing E.P. (Eds.). JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2014. P. 1188—1196. URL: <http://jmlr.org/proceedings/papers/v32/le14.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
7. **Rubinstein R.** The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization // Methodology and Computing in Applied Probability. 1999. No. 1, 2. P. 127—190.
8. **Tsoumakas G., Katakis I.** Multi-label classification: An overview // International Journal of Data Warehousing and Mining 3. 2006. No. 3.
9. **Allamanis M., Peng H., Sutton C.A.** A Convolutional Attention Network for Extreme Summarization of Source Code / In Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, ICML 2016, New York City, NY, USA, 19—24.06.2016. P. 2091—2100. URL: <http://jmlr.org/proceedings/papers/v48/allamanis16.html> (дата обращения: 15.01.2021).
10. **Iyer S., Konstas I., Cheung A., Zettlemoyer L.** Summarizing Source Code using a Neural Attention Model / In Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, ACL 2016. 07—12.08.2016. Berlin, Germany. Vol. 1: Long Papers. URL: <http://aclweb.org/anthology/P/P16/P16-1195.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
11. **Allamanis M., Barr E.T., Devanbu P., Sutton C.** A Survey of Machine Learning for Big Code and Naturalness. arXiv preprint arXiv:1709.06182. 2017 <http://arxiv.org/pdf/1709.06182.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
12. **Alon U., Zilberstein M., Levy O., Yahav E.** A General Path-based Representation for Predicting Program Properties / In Proceedings of the 39th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation PLDI 2018, ACM, New York, NY, USA, 2018. С. 404—419. URL: <https://doi.org/10.1145/3192366.3192412> (дата обращения: 15.01.2021).
13. **Raychev V., Vechev M., Krause A.** Predicting Program Properties from «Big Code» / In Proceedings of the 42nd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages POPL '15, ACM, New York, NY, USA, 2015. P. 111—124. URL: <https://doi.org/10.1145/2676726.2677009> (дата обращения: 15.01.2021).
14. **Allamanis M., Sutton C.** Mining Source Code Repositories at Massive Scale Using Language Modeling / In Proceedings of the 10th Working Conference on Mining Software Repositories MSR '13, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 2013. P. 207—216. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2487085.2487127> (дата обращения: 15.01.2021).
15. **Hindle A., Barr E.T., Su Z., Gabel M., Devanbu P.** On the Naturalness of Software / In Proceedings of the 34th International Conference on Software Engineering ICSE '12 IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 2012. P. 837—847. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2337223.2337322> (дата обращения: 15.01.2021).
16. **Movshovitz-Attias D., Cohen W.W.** Natural language models for predicting programming comments, Sofia, Bulgaria: Association for Computational Linguistics, 2013. <http://www.aclweb.org/anthology/P13-2007.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).
17. **White M., Vendome C., Linares-Vásquez M., Poshvanyk D.** Toward Deep Learning Software Repositories / In Proceedings of the 12th Working Conference on Mining Software Repositories MSR '15, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, 2015. P. 334—345. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2820518.2820559> (дата обращения: 15.01.2021).
18. **Bielik P, Raychev V., Vechev M.T.** PHOG: Probabilistic Model for Code / In Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning, ICML 2016, New York City, NY, USA, 19—24.06.2016. P. 2933—2942. URL: <http://jmlr.org/proceedings/papers/v48/bielik16.html> (дата обращения: 15.01.2021).
19. **Allamanis M., Barr E.T., Bird C., Sutton C.** Learning Natural Coding Conventions. In Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering FSE 2014, ACM, New York, NY, USA, 2014. NLP-293. URL: <https://doi.org/10.1145/2635868.2635883> (дата обращения: 15.01.2021).
20. **Fowler M., Beck K.** Refactoring: Improving the Design of Existing Code. Boston, Massachusetts, USA: Addison-Wesley Professional, 1999.
21. **Mikolov T., Yih Wen-tau, Zweig G.** Linguistic regularities in continuous space word representations / In Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Atlanta, Georgia, USA: Human Language Technologies. 2013. URL: <http://www.aclweb.org/anthology/N13-1090.pdf> (дата обращения: 15.01.2021).

Ссылка для цитирования

Зорченков А.М. Векторизация программного кода // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 211—218.

УДК 629.7.015.3:533.698

В.А. Баринов, д-р техн. наук, **В.Б. Курилов**, **О.В. Павленко**, канд. техн. наук
(ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт», г. Жуковский)

olga.v.pavlenko@yandex.ru

ОБТЕКАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МОТОГОНДОЛЫ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ И ДРОССЕЛЬНЫМИ ШАЙБАМИ ВНУТРИ КАНАЛА

На примере модели осесимметричной мотогондолы выполнены расчёты обтекания при наличии центрального тела и дроссельных шайб. Расчёты проведены при числе Маха $M = 0,8$ с помощью программы FLUENT, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. В результате численных исследований получены данные о распределении давления по контуру всех элементов при вариации расхода на донном срезе и определены аэродинамические нагрузки на элементах мотогондолы.

Ключевые слова: мотогондолы; дроссельные шайбы; расчётные методы.

On the example of a model for an axisymmetric motogondola the calculations of the flow in the presence of a central body and throttle washers are performed. The calculations are carried out at the Mach number $M = 0.8$ by using the FLUENT program based on the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier — Stokes equations. As a result of numerical researches, data on the pressure distribution along the contour of all elements with a variation in the flow rate at the bottom shear are obtained and aerodynamic loads on the elements of the gondola are determined.

Keywords: motogondola; choke washers; calculation methods.

Введение. При создании двигателей современных самолётов решаются многие задачи по экономичности, устойчивости работы, возможности запуска после остановки и т. д. Одной из таких задач является обеспечение дросселирования и реверсирования, т. е. уменьшение или увеличение тяги двигателя. Существуют экспериментальные и расчётные методы исследования таких режимов. В работе [1] наряду с экспериментальными измерениями полного и статического давлений в сечении торцевого среза сопла были проведены расчётные исследования обтекания мотогондолы двигателя без центрального тела в зависимости от расхода воздуха, проходящего через неё, выполненные по программе, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса. При достаточно хорошем согласовании результатов расчёта с экспериментальными данными, полученными для этой мотогондолы в аэродинамической трубе Т-128 ЦАГИ, были показаны особенности обтекания моделей мотогондол при изменении коэффициента расхода воздуха, приведены величины составляющих сопротивления — сопротивления трения и давления, а также дана оценка полному сопротивлению мотогондол. Данная работа продолжает эти исследования.

Для моделирования расхода воздуха, проходящего через мотогондолу двигателя, в экспериментальных исследованиях ЦАГИ на мотогондолах в районе среза сопла применяют дроссельные шайбы. В работе [2] приведена их форма, обеспечивающая близкое к равномерному распределению параметров течения в сечении среза сопла. Но на мотогондолах натуральных турбореактивных двигателей есть центральное тело, на котором расположены турбины вентилятора и компрессора, камера сгорания и т. д. Основные закономерности обтекания мотогондолы с центральным телом описаны в работах [3—5]. По расчётам обтекания бесконечно длинной мотогондолы и центрального тела идеальной жидкостью, а также по результатам экспериментальных исследований показано, что такие характеристики воздухозаборника, как сопротивление давления, зависят, в основном, от расхода воздуха через мотогондолу [3, 4], а характеристики сопел существенно зависят от их геометрии, в том числе от наличия центрального тела [5].

В работе [1] использованы величины статического давления p непосредственно на твёрдом контуре для вычисления сил, действующих как на внешнюю, так и на внутреннюю поверхности мотогондолы. Такой способ логичнее, чем в работе [2], где сила на

твёрдый внешний контур принимается как разность экспериментально измеренной с помощью аэродинамических весов силы на всей мотогондоле и силы на жидкий контур, вычисленной с применением теоремы импульсов по измерениям скорости и давления в сопловом сечении.

Использование теоремы импульсов для однородной трубки тока справедливо. Но если внутри трубки тока есть инородное тело, куда линии тока не попадают, то такие случаи подлежат отдельному рассмотрению [6].

Численные методы на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS) применяются при проектировании мотогондол. В работе [7] приведены результаты оптимального аэродинамического проектирования обводов мотогондолы маршевой силовой установки дозвукового самолёта, аэродинамические нагрузки рассчитываются путём интегрирования сил давления и трения по всем (внутренним и внешним) твёрдым поверхностям. Полученная мотогондола (в отличие от базовой) удовлетворяет всем аэродинамическим ограничениям и, в частности, требованию её безотрывного обтекания на допустимых режимах полёта.

В целях исследования течений на режимах дросселирования, где имеются области с отрывом потока, в настоящей работе было решено провести расчёт с различными вариантами дроссельных шайб не только на мотогондоле, но и на центральном теле для конечной мотогондолы с отношением длины мотогондолы к диаметру носка на входе, равным 1,5 [1]. Была взята близкая по геометрии мотогондола и проведены численные исследования различных вариантов с центральным телом и дроссельными шайбами при числе Маха $M = 0,8$ и числе Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^6$.

Геометрические данные исследуемых моделей и условия расчёта. Численное исследование обтекания мотогондолы двигателя с центральным телом было проведено на пяти математических моделях мотогондол:

вариант 1 — без центрального тела и дроссельных шайб;

вариант 2 — с центральным телом;

вариант 3 — с центральным телом и дроссельной шайбой на нём;

вариант 4 — с центральным телом и дроссельной шайбой на гондоле;

вариант 5 — с центральным телом и дроссельной шайбой на нём в середине мотогондолы, а не в области сечения среза сопла.

Общий вид и размеры расчётных моделей, округлённые до двух знаков, показаны на рис. 1. Минимальные площади протоков $S_{\text{прот}}$ и их безразмерные величины по отноше-

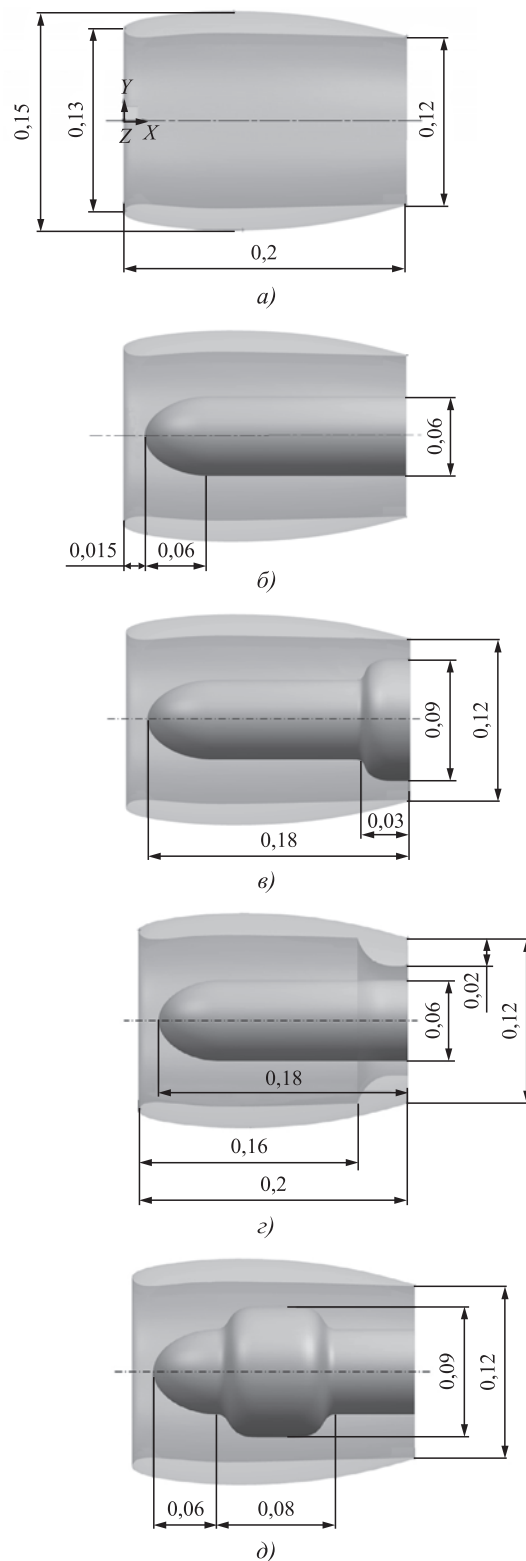


Рис. 1. Общий вид расчётных моделей, м:
а — вариант 1; б — вариант 2; в — вариант 3; з — вариант 4; д — вариант 5

Площади протоков мотогондол

Характерные размеры	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Площади протоков мотогондол S , м ²	0,0108	0,0082	0,0045	0,0023	0,0053
Относительные площади протоков мотогондол $\bar{S} = S/0,013$	0,8161	0,6202	0,3378	0,1763	0,4006

нию к площади в сечении носка мотогондолы $\bar{S}_{\text{прот}} = S_{\text{прот}}/S_{\text{носка}}$ — для вариантов 1—4 в сечении среза сопла, а для варианта 5 — в сечении $x = 0,1$ м, показаны в таблице.

В данной работе безразмерные коэффициенты сопротивления мотогондолы и её элементов будут определяться как $C_x = X/(q_{\infty} S_{\text{крыла}})$, а за характерную площадь, как и в работе [1], принята площадь крыла модели самолёта $S_{\text{крыла}} = 0,1745$ м².

Методика и условия расчёта. Численные исследования проведены по программе ANSYS FLUENT с использованием модели турбулентности k — ε *realizable* с улучшенным моделированием параметров турбулентности вблизи стенки и с учётом влияния градиента давления. Для разрешения пограничного слоя была создана специальная сетка o-grid, построенная по нормали к поверхности и содержащая по высоте 25 ячеек. В пристеночной области использовалась однопараметрическая модель турбулентности, адаптированная к течениям с малыми числами Рейнольдса. Решаемые в процессе расчёта уравнения были аппроксимированы с помощью конечно-объёмных схем второго порядка точности.

Расчётное исследование проведено для адиабатического течения при условии отсутствия теплопередачи. Расчёты выполнены в соответствии с условиями эксперимента в АДТ при числах $M = 0,8$ и $Re = 3 \cdot 10^6$ на структурированной сетке, содержащей около 10 млн ячеек (рис. 2).

Результаты численных исследований обтекания мотогондолы двигателя с различными формами центрального тела. Результаты расчёта — поля скоростей в центральном сечении по оси симметрии приведены на рис. 3. Касательно особенностей обтекания следует отметить, что наличие центрального тела (рис. 3, б) приводит к увеличению интенсивности скачка уплотнения на внешней поверхности мотогондолы и уменьшению скоростей в области её носка во внутреннем канале. При этом за центральным телом образуется зона срыва потока.

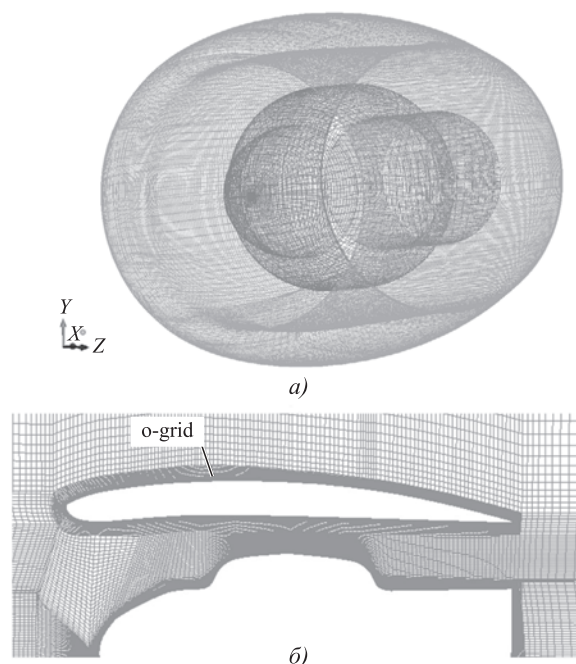


Рис. 2. Расчётная сетка варианта 5:

а — на поверхности модели; б — в сечении плоскостью XOY , $z = 0$

Наличие дроссельной шайбы на центральном теле (рис. 3, в) приводит к дальнейшему снижению скоростей внутри канала, уменьшению расхода через мотогондолу и к более развитому срыву потока в области за центральным телом.

Дроссельная шайба на гондоле в варианте 4 (рис. 3, г) с ещё бóльшим уменьшением проточной площади приводит к сильному изменению обтекания на внешней поверхности, ликвидации сверхзвуковой зоны в районе носка, а также к возникновению отрывного течения на всей внешней поверхности мотогондолы. При таком уменьшении расхода через мотогондолу на её внутреннем контуре возникает значительное смещение по потоку зоны торможения, которое приводит к бóльшему нарастанию скорости невязкого течения по направлению к носку мотогондолы и срыву потока, аналогичному срыву с кромки диска, поставленного перпендикулярно скорости течения.

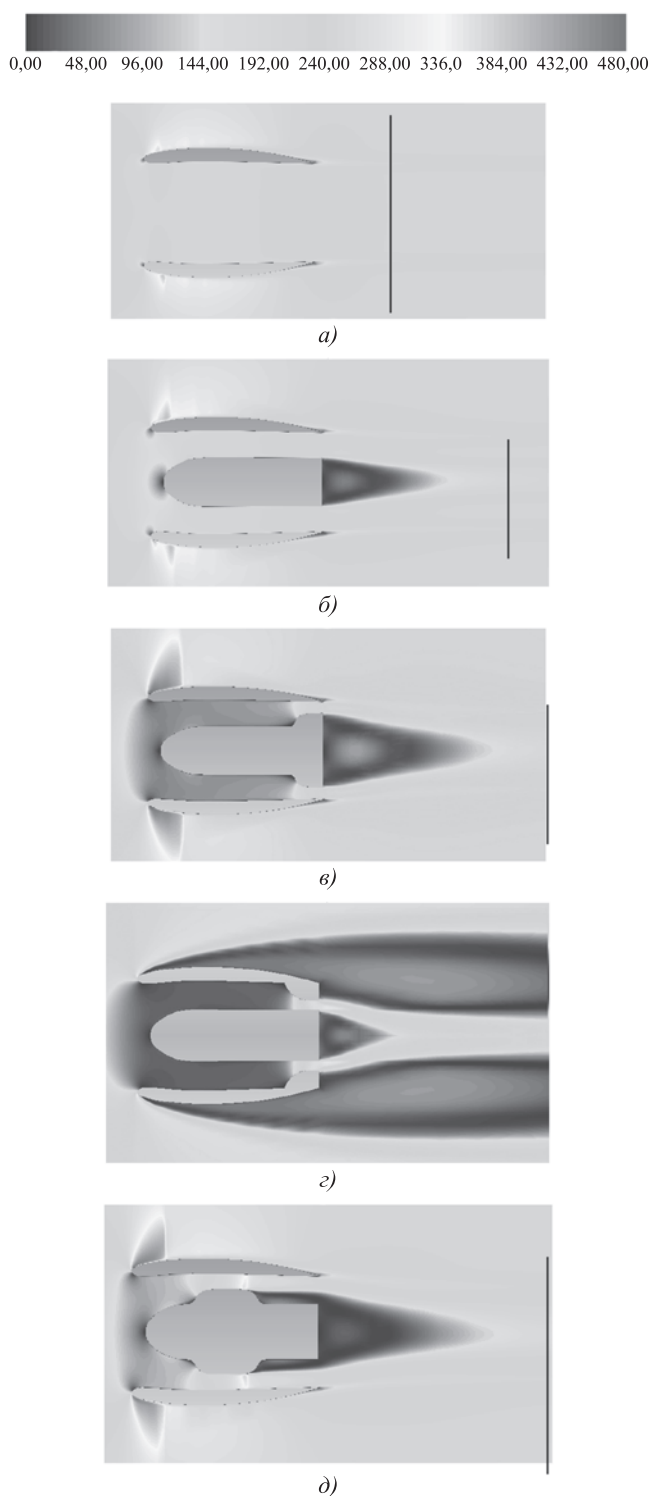


Рис. 3. Поле скоростей при обтекании мотогондолы, м/с: *a* — вариант 1; *b* — вариант 2; *в* — вариант 3; *г* — вариант 4; *д* — вариант 5

При расположении дроссельной шайбы в середине мотогондолы (рис. 3, *д*) на её внешней поверхности наблюдается наличие сверхзвуковой области. В проточном сечении канала мотогондолы $x \approx 0,1$ м наблюдается довольно равномерное течение, а дальше по потоку

картина обтекания существенно меняется — возникает отрыв сразу за шайбой и более интенсивный срыв потока за центральным телом.

Установка центрального тела и дроссельных шайб приводят и к изменению статического давления на поверхности мотогондолы. Распределение коэффициента статического давления по контуру мотогондолы и центрального тела показаны на рис. 4. На графиках коэффициент статического давления определён как отношение статического давления к скоростному напору в набегающем потоке p/q_∞ и связан с местным числом Маха газодинамическим соотношением

$$p/q_\infty = 2,23[(1 + 0,2M_\infty^2)/(1 + 0,2M^2)]^{3,5}, \quad (1)$$

где p — давление; q_∞ — скоростной напор набегающего потока; M_∞ — число Маха набегающего потока; M — местное число Маха.

По формуле (1) можно найти число Маха в определённой точке и зону сверхзвукового течения. Отметим некоторые характерные величины коэффициента статического давления p/q_∞ : $p_0/q_\infty (M = 0) \approx 3,4$ (давление торможения), $p_\infty/q_\infty (M = 0,8) \approx 2,23$, $p/q_\infty (M = 1) \approx 1,8$, $p/q_\infty (M = 1,5) \approx 1$. Так, дозвуковое течение характеризуется коэффициентами давления от 3,4 до 1,8, а сверхзвуковое — менее 1,8.

Во внутреннем канале мотогондолы видно довольно равномерное распределение давления с небольшим отличием в середине мотогондолы от давления в зоне перед дроссельной шайбой. Следует отметить, что на торцевых поверхностях мотогондолы и центрального тела давление приблизительно равно значению в набегающем потоке (рис. 5). Этот результат известен и отмечен и в работе [2].

Коэффициенты давления и их распределение вдоль контура воздухозаборника — передней части мотогондолы рассматриваемой формы конечной длины близки к величинам без центрального тела из работы [1], что согласуется с выводами о небольшом влиянии установки центрального тела на обтекание воздухозаборника гондолы [3, 5]. Распределение коэффициента давления в сопловой части гондолы существенно зависит от геометрии элементов в этой области — контуров сопловой части, центрального тела и дроссельных шайб.

Распределение удельного расхода, который определялся как отношение $\theta = \rho V / (\rho_\infty V_\infty)$ (вместо стандартного определения $\rho V / (\rho_* V_*)$), где ρ_* , V_* — критические плотность и скорость

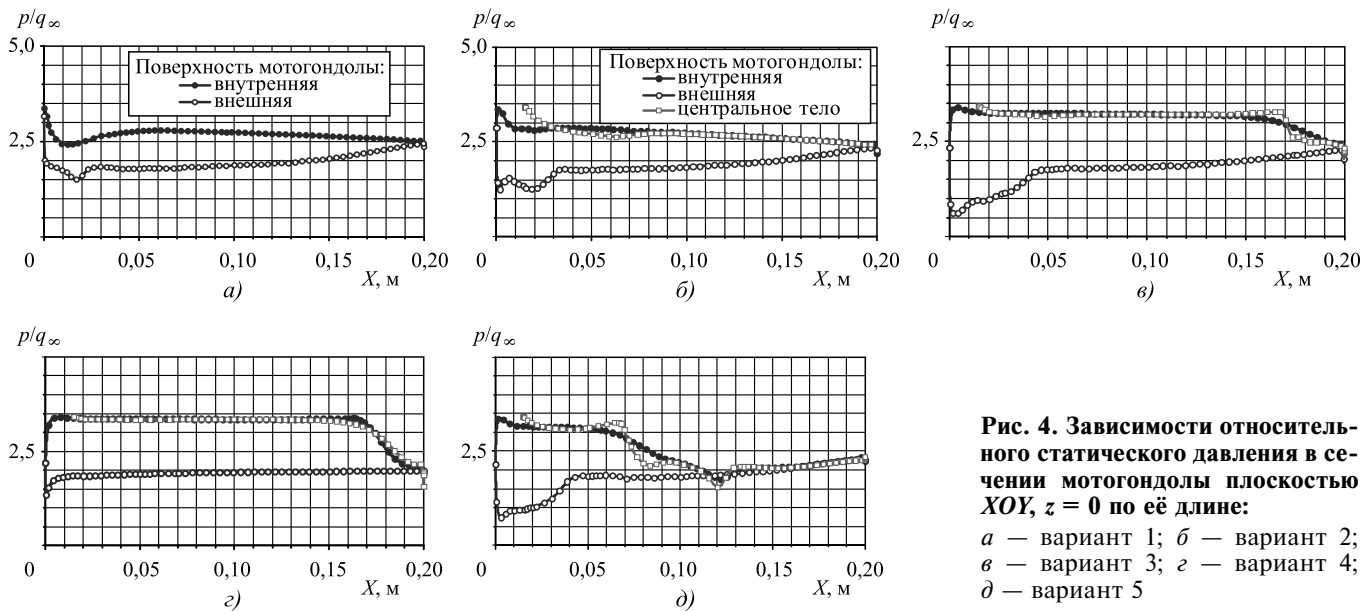


Рис. 4. Зависимости относительного статического давления в сечении мотогондолы плоскостью XOY , $z = 0$ по её длине:

a — вариант 1; b — вариант 2; v — вариант 3; d — вариант 4; d — вариант 5

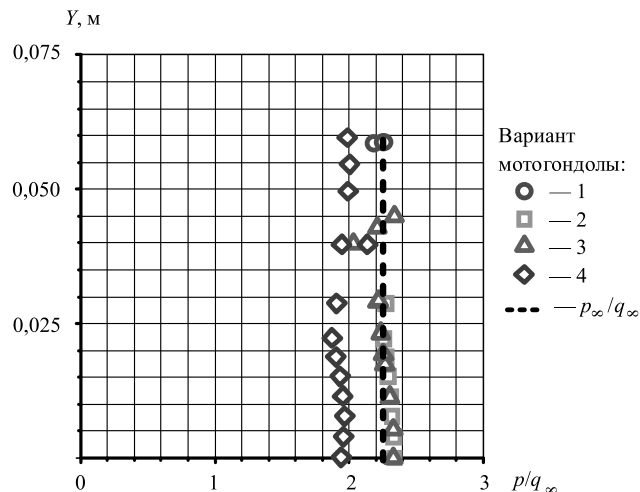


Рис. 5. Зависимость донного давления от расстояния до оси симметрии

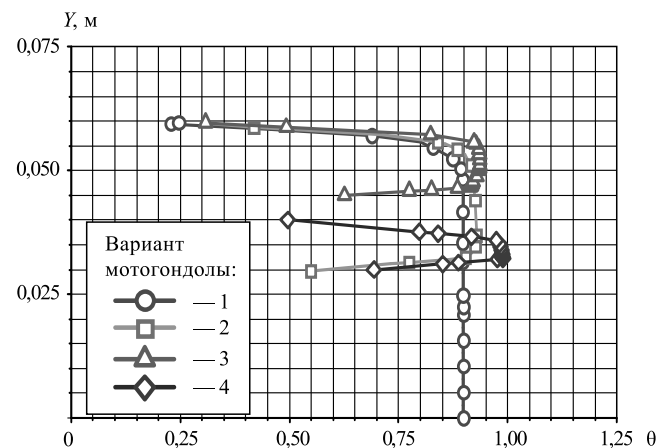


Рис. 6. Распределение удельного расхода по проточной площади в сечении торцевой части сопла $q = \rho V / (\rho_\infty V_\infty)$

потока), для рассмотренных расчётных вариантов показано на рис. 6 по сечению проточной площади на срезе сопла. Безразмерные коэффициенты расхода воздуха через проточные площади $f = [(\rho V) 2\pi y dy] / (\rho_\infty V_\infty S_{\text{носка}})$ равны 0,7, 0,55, 0,3, 0,14 для вариантов 1—4 соответственно, а средние величины удельного расхода, осреднённого по площади проточного сечения, $\theta_{\text{ср}} = [(\rho V) / (\rho_\infty V_\infty)]_{\text{ср}} = \{ \int_{S_{\text{прот}}} [(\rho V) / (\rho_\infty V_\infty)] ds \} / S_{\text{прот}}$, равные $f / \bar{S}_{\text{прот}}$, где $\bar{S}_{\text{прот}} = S_{\text{прот}} / S_{\text{носка}}$, имеют значения 0,86, 0,89, 0,88, 0,79 для вариантов 1—4, т. е. вполне сопоставимы между собой.

Для варианта 5 удельный расход определялся в сечении $x = 0,1$ м, где имеется равномерное течение (см. рис. 3). По среднему значению числа Маха $M_{\text{ср}} = F(p_{\text{ср}}/q_\infty)$, которое можно опреде-

лить по формуле (1), а затем по соотношению между удельным расходом и числом Маха

$$\rho V / (\rho_\infty V_\infty) = (M/M_\infty) [(1 + 0,2M_\infty^2) / (1 + 0,2M^2)]^3 \quad (2)$$

можно найти средний удельный расход воздуха $\theta_{\text{ср}}$ и коэффициент расхода через сечение мотогондолы. Так, величина безразмерного коэффициента расхода воздуха f для варианта 5 примерно равна 0,35, а средний по площади удельный расход воздуха $\theta_{\text{ср}} = \rho V / (\rho_\infty V_\infty) \approx 0,87$.

На обтекаемую поверхность мотогондолы действуют перпендикулярные этой поверхности силы давления, направленные внутрь твёрдого тела, и силы трения, касательные к поверхности. Для осесимметричного тече-

ния силу давления на элементе в виде трапеции (со знаком минус для внешней поверхности и знаком плюс для внутренней поверхности) между близкими сечениями по азимутальному углу $d\varphi$, по продольным координатам x_1 и x_2 с координатами твёрдого контура y_1 и y_2 можно представить в виде $p(d\varphi 0,5(y_1 + y_2)\Delta l)$, где Δl — длина участка твёрдого контура между сечениями x_1 и x_2 . Проекция силы давления на продольную ось X равна $p(d\varphi 0,5(y_1 + y_2)\Delta l)[(y_2 - y_1)/\Delta l]$. Проинтегрировав по углу φ , получим со знаком «+» для внешней и знаком «-» для внутренней поверхности $\pm p(\pi y_2^2 - \pi y_1^2) = p(S_2 - S_1) = pds$. При этом проекция силы давления на ось OX будет положительной или отрицательной в зависимости от того, возрастает или уменьшается координата y и площади $S = \pi y^2$. Суммируя эти величины, получим силу сопротивления давления $X_{\text{давл}} = \int pds$ на участок между сечениями от некоторого значения x_0 до выбранной величины x . Коэффициент силы сопротивления давления составит

$$C_{xp} = X_{\text{давл}} / (q_{\infty} S_{\text{крыла}}).$$

Важной характеристикой является сопротивление поверхности на различных участках обтекаемой поверхности. Нарастание коэффициента сопротивления давления $C_{xp}(x)$ по контуру мотогондолы от $x = 0$ до $x = 0,2$ м и центрального тела от $x = 0,015$ м до $x = 0,2$ м дано на рис. 7. Отметим, что величина C_{xp} сначала от носка увеличивается, а потом начинает уменьшаться и в конце мотогондолы может быть как положительной, так и отрицательной. Сопротивление давления на дроссельных шайбах можно определить как разность между значениями C_{xp} при координате x начала и конца дроссельной шайбы.

Для приближённой, порядковой оценки коэффициент сопротивления трения $C_{x\text{тр}}$ на контуре мотогондолы и центрального тела находим по соотношениям для пластинки по омываемой площади гондолы и центрального тела, по числу Маха, числу Рейнольдса по длине мотогондолы и скоростному напору $q_{\text{прот}}$ в её середине:

$$C_{x\text{тр}} = X_{\text{тр}} / (q_{\infty} S_{\text{крыла}}) = C_{x\text{пласт}}(\text{Re})(q_{\text{прот}} S_{\text{пов мг или ц. тела}}) / (q_{\infty} S_{\text{крыла}}).$$

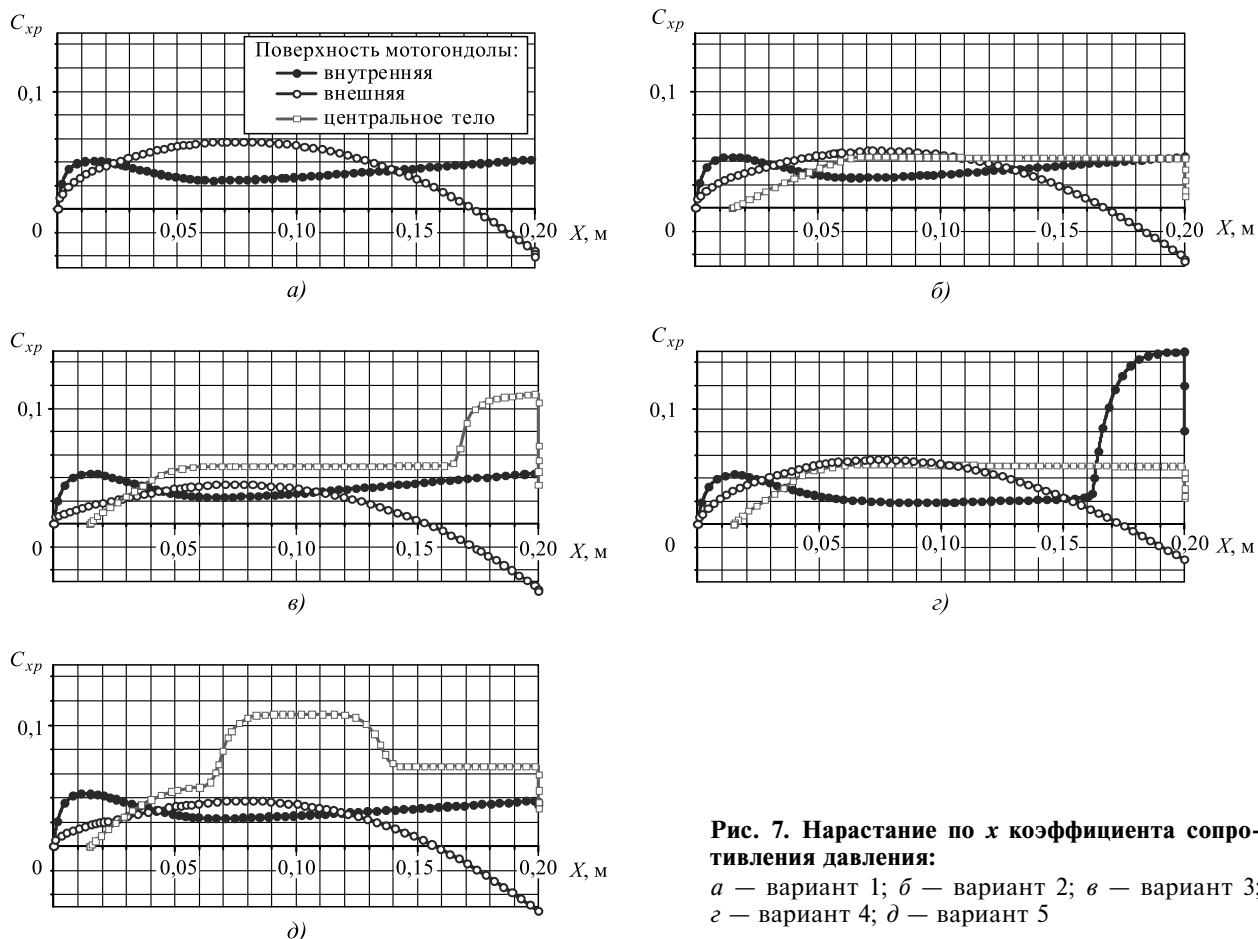


Рис. 7. Нарастание по x коэффициента сопротивления давления:

a — вариант 1; $б$ — вариант 2; $в$ — вариант 3; $г$ — вариант 4; $д$ — вариант 5

Коэффициенты сопротивления давления $C_{x p}$ и сопротивления трения $C_{x тр}$ для вариантов 1—4, определённые расчётом по осреднённым уравнениям Навье—Стокса, а также путём интегрирования сопротивлений давления на контурах мотогондолы и центрального тела и приближённого определения сопротивления трения представлены на рис. 8, где суммарное сопротивление равно сумме $\Sigma = C_{x p} + C_{x тр}$. Видно, что они близки по значению. Следует отметить, что сопротивление давления составляет большую часть общего сопротивления мотогондолы, чем сопротивление трения.

По результатам расчётов сопротивления мотогондолы (см. рис. 8) и величин расхода через неё, а также по характеру течения внутри канала можно оценить область допустимых значений расхода для геометрических данных рассматриваемой мотогондолы с центральным телом и дроссельных шайб. А именно, допустимые значения безразмерного коэффициента расхода $f = 0,3...0,7$ — примерно такое же, как для мотогондолы без центрального тела. Варианты 4 и 5 применять нецелесообразно вследствие образования развитых отрывных зон на внешней области и внутри канала, что может привести к нестационарности течения и бафтингу.

Сопротивление давления на дроссельные шайбы можно определить по результатам расчёта сопротивления давления $C_{x p}$ на участках от начала дроссельной шайбы до точки на торце дросселя, где площади лицевой и тор-

цевой поверхности становятся равными (см. рис. 7). Так, для варианта 3 сопротивление давления на дроссельные шайбы фактически определяет суммарное сопротивление давления. В подобных случаях желательно иметь возможность оценки сопротивления давления для других вариантов гондол и дроссельных шайб с отличающейся геометрией.

Приближённо сопротивление давления на дроссельные шайбы можно определить по значениям двух величин статического давления

$$X_{p \text{ дрос}} = \int p ds = 0,5(p_1 + p_2)(S_2 - S_1) - p_{\text{дон}} S_{\text{дон}},$$

где $p_1, p_2, p_{\text{дон}}$ — значения статического давления в начале, в конце дроссельной шайбы и на торцевой поверхности; $S_2 - S_1 = \pi(y_2^2 - y_1^2)$ — площадь лицевой поверхности шайбы; $S_{\text{дон}}$ — площадь торцевой поверхности шайбы, равная площади лицевой поверхности.

Величины $p_1/q_\infty, p_2/q_\infty$ находим по соотношениям (1) и (2) в точках $x = 0,1$ м, $x = 0,2$ м по значениям средних значений удельного расхода воздуха $\theta_{\text{ср}}$ в сечениях $x = 0,1$ м, $x = 0,2$ м. Из равенства расходов в сечениях $x = 0,1$ м, $x = 0,2$ м $\rho_1 V_1 S_1 = \rho_2 V_2 S_2 = f \rho_\infty V_\infty S_{\text{носокка}}$ — можно определить $\theta_1 = (\rho_1 V_1)/(\rho_\infty V_\infty) = f S_{\text{носокка}}/S_1$.

Величина θ_2 на срезе сопла примерно равна 0,87. Соотношения (1) и (2) можно соединить до зависимости $p/q_\infty = F(\theta)$, чтобы исключить несколько сложную процедуру определения значений $M_{\text{ср}}$ по величине $\theta_{\text{ср}}$ и затем использования значений $M_{\text{ср}}$ для вычисления коэффициента давления.

Варьируя величиной f , получаем сопротивление давления в функции от коэффициента расхода f . Данный способ приближённой оценки сопротивления давления дроссельных шайб при вариации их размеров вполне применим для быстрого получения результатов и качественного сравнения нескольких вариантов мотогондол с различными дроссельными шайбами.

Коэффициенты сопротивления давления $C_{x p}$ на поверхности мотогондолы и на центральном теле показаны на рис. 9. На графиках видно, что исследуемые варианты мотогондол отличаются некоторыми особенностями. Так, например, для вариантов 2 и 3 суммарное сопротивление давления мотогондолы отрицательно вследствие больших величин давления на участках от середины до конца её внешнего контура, где проекция силы давления на ось ОХ отрицательна.

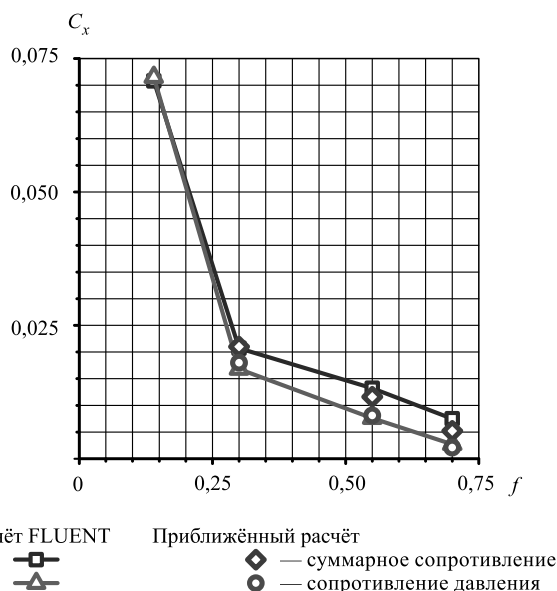


Рис. 8. Сравнение результатов расчётов

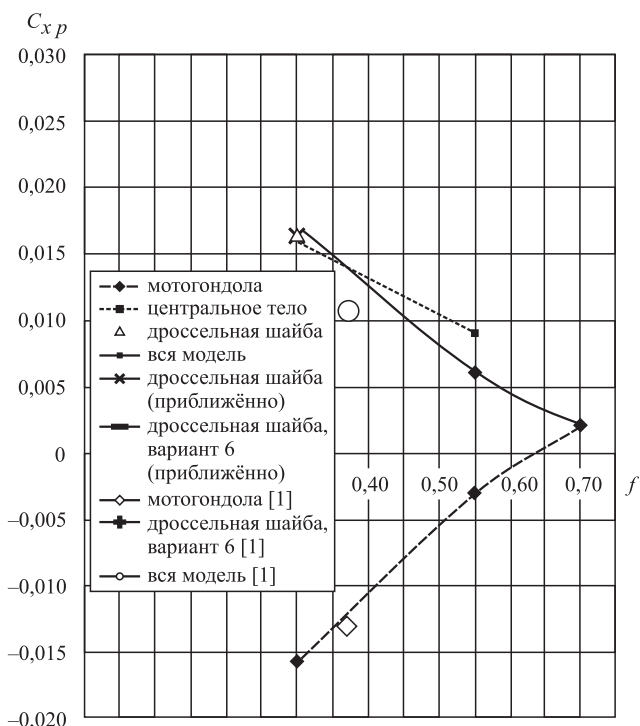


Рис. 9. Результаты расчёта коэффициентов сопротивления мотогондолы, центрального тела и дроссельных шайб

На рис. 9 также приведены величины сопротивления давления $C_{x p}$ элементов мотогондолы без центрального тела из работы [1], которые показывают, что $C_{x p}$ самой мотогондолы образуют примерно одинаковую зависимость от f , но зависимости коэффициентов давления $C_{x p}$ на дроссельных шайбах от f различны и суммарные величины $C_{x p}$ также различаются ещё и вследствие наличия центрального тела.

Выводы. Для компоновки мотогондолы конечной длины с центральным телом внутри канала, как и для свободно проточной мотогондолы, распределение давления и коэффициенты сопротивлений на поверхности воздухозаборника (первой половины длины мотогондолы) определяются величиной расхода воздуха через мотогондолу, а сопротивление давления увеличивается с её уменьшением. Для сопловой части (второй половины длины мотогондолы) распределение давления и сопротивление давления отличаются от соответствующих величин (при том же значении

коэффициента расхода f) для мотогондолы без центрального тела и зависят от геометрии дроссельных шайб и их расположения в сопловой части — на мотогондоле или на центральном теле.

Зависимость полного коэффициента сопротивления мотогондолы с центральным телом внутри канала отличается от зависимости для гондолы без центрального тела. Но допустимый диапазон коэффициентов расхода воздуха через мотогондолу рассмотренной геометрии может составить 0,7...0,3, примерно такой же, как и для мотогондолы без центрального тела.

Библиографические ссылки

1. **Баринов В.А., Птицин А.А., Скоморохов С.И., Слитинская А.Ю., Теперин Л.Л.** О методике оценки внутреннего сопротивления моделей мотогондол с протоком / Труды ЦАГИ. Вып. 2773. М.: Изд. отдел ЦАГИ, 2018.
2. **Блищ В.Г.** О внешних и внутренних аэродинамических силах и моментах летательных аппаратов с ВРД и их моделей при ненулевых углах атаки и скольжения / Труды ЦАГИ. Вып. 2328. М.: Изд. отдел ЦАГИ, 1987. С. 1—17.
3. **Кюхеман Д., Вебер И.** Аэродинамика авиационных двигателей / пер. с англ. В.М. Борисенко, Ю.Б. Елисеева, Л.И. Соркина, И.С. Эльперина / под ред. Д.А. Мельникова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956.
4. **Голубев В.А.** Двухконтурные авиационные двигатели. М.: Изд-во МАИ, 1983.
5. **Лаврухин Г.Н., Иванькин М.А., Талызин В.А.** Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. III. Внешнее сопротивление и потери эффективной тяги сопел. М.: Физматлит, 2017.
6. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950. С. 138.
7. **Зленко Н.А., Михайлов С.В., Савельев А.А., Шенкин А.В.** Методика оптимального аэродинамического проектирования мотогондолы ТРДД с большой степенью двухконтурности // Учёные записки ЦАГИ. 2015. Т. XLVI. № 6. С. 20—37.

Ссылка для цитирования

Баринов В.А., Курилов В.Б., Павленко О.В. Обтекание осесимметричной мотогондолы с центральным телом и дроссельными шайбами внутри канала // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 219—226.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:
«Пресса России» — индекс 27838.

УДК 681.5.073

Ю.Г. Оболенский, д-р техн. наук, **А.А. Крошкина**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
id148230097@gmail.com

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НОРМАЛЬНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ

Рассмотрена проблема повышения точности систем стабилизации нормальной перегрузки, связанная с особенностью структуры контура управления. Установлена причина возникновения ошибки в контуре стабилизации. Проведён анализ способов уменьшения погрешности в контуре стабилизации нормальной перегрузки. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: точность систем автоматического управления; системы стабилизации; нормальная перегрузка; ПИ-регулятор.

The problem of increasing the accuracy of stabilization systems for normal overload, which is associated with a specific structure of the control loop is considered. The cause of the error in the stabilization loop is determined. The analysis of ways to reduce the error in the normal overload stabilization loop is carried out. The simulation results are presented.

Keywords: accuracy of automatic control systems; stabilization systems; normal overload; PI regulator.

Введение. При синтезе современных систем автоматического управления летательных аппаратов, выполняющих сложные движения, существует проблема стабилизации контура управления по перегрузкам. Наиболее сложной для стабилизации является нормальная перегрузка, так как для изменения направления полёта летательного аппарата необходимо управлять нормальными перегрузками. При управлении нормальными перегрузками посредством изменения углового положения летательного аппарата соответствующие каналы системы стабилизации становятся составной частью системы наведения. Поэтому выбор характеристик и параметров этих каналов за-

висит от требований, предъявляемых к системе наведения [1]. Статья посвящена решению проблемы синтеза систем стабилизации нормальной перегрузки с заданной точностью. Для повышения точности систем управления летательных аппаратов по нормальной перегрузке рассмотрено введение в контур стабилизации ПИ-регулятора.

Основная часть. В отличие от систем стабилизации углов (тангажа, крена, курса), в которых присутствует естественный астатизм в виде интегрирования соответствующих угловых скоростей, система стабилизации нормальной перегрузки, структурная схема которой представлена на рис. 1, является статической.

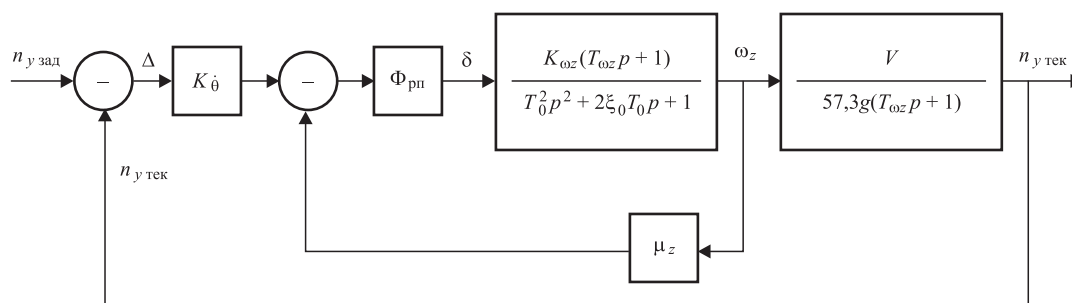


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации нормальной перегрузки:

$n_{y \text{ зад}}$ — заданное значение нормальной перегрузки; $n_{y \text{ тек}}$ — текущее значение нормальной перегрузки; Δ — сигнал рассогласования; δ — угол отклонения органа управления (руля высоты); ω_z — угловая скорость тангажа; $K_{\dot{\theta}}$ — коэффициент усиления в прямой цепи; $\Phi_{\text{ПИ}}$ — передаточная функция рулевого привода; K_{ω_z} — коэффициент усиления по угловой скорости тангажа; T_{ω_z} — постоянная времени по угловой скорости тангажа; T_0 — постоянная времени объекта; ξ_0 — коэффициент затухания объекта; μ_z — коэффициент обратной связи по угловой скорости тангажа; V — скорость полёта; g — ускорение свободного падения

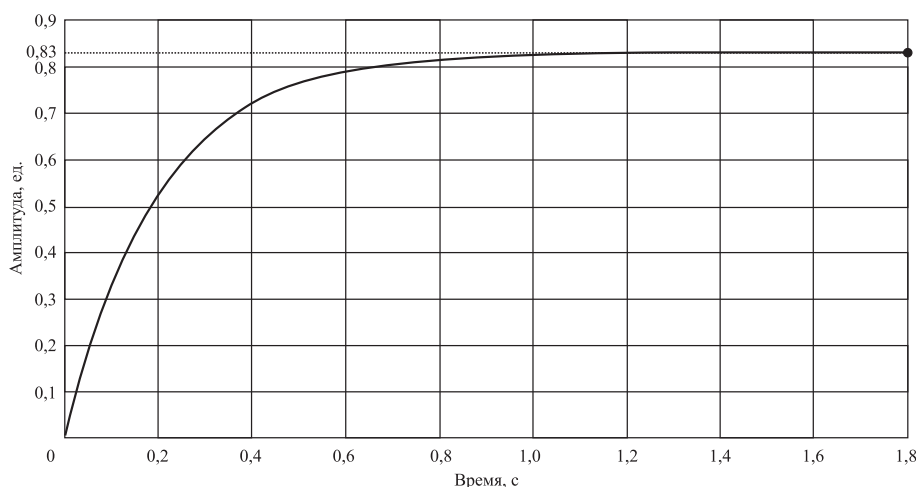


Рис. 2. Переходная характеристика системы стабилизации нормальной перегрузки

Следовательно, при обработке входного сигнала в ней присутствует статическая ошибка, обратно пропорциональная по величине коэффициенту усиления в прямой цепи (переходный процесс представлен на рис. 2).

Статическая ошибка при заданной величине в одну единицу перегрузки составляет 0,17 ед.

Преобразуем структурную схему системы стабилизации нормальной перегрузки для вычисления статической ошибки в аналитическом виде (рис. 3—5) [2].

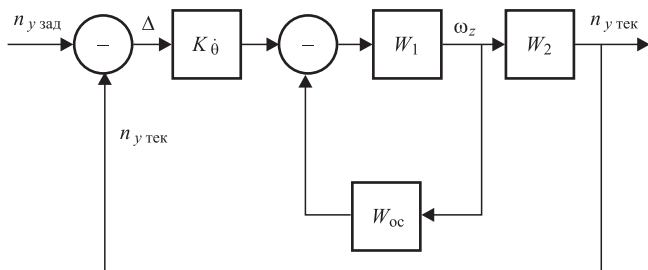


Рис. 3. Эквивалентная структурная схема системы стабилизации нормальной перегрузки

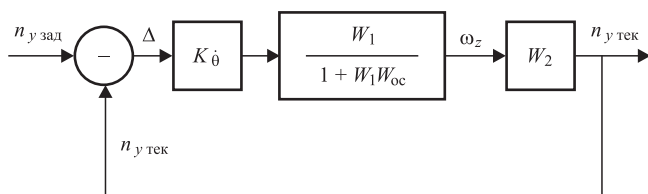


Рис. 4. Эквивалентная структурная схема системы стабилизации нормальной перегрузки, приведённая к единичной обратной связи

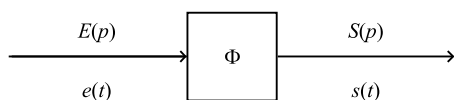


Рис. 5. Схематичное представление замкнутой системы стабилизации нормальной перегрузки

Передаточная функция всей системы рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{K_{\dot{\theta}} \frac{W_1}{1 + W_1 W_{oc}} W_2}{1 + K_{\dot{\theta}} \frac{W_1}{1 + W_1 W_{oc}} W_2} \quad (1)$$

Ошибка имеет следующую зависимость от параметров системы и входного ступенчатого воздействия с амплитудой A :

$$\begin{aligned} Q(p) &= E(p) - S(p) = \\ &= E(p) - E(p)\Phi(p) = \\ &= E(p)[1 - \Phi(p)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассчитаем установившуюся ошибку, используя предельный переход в преобразовании Лапласа [2]:

$$\begin{aligned} Q(t) &= p[1 - \Phi(p)]E(p) = \\ &= p[1 - \Phi(p)] \frac{A}{p} = [1 - \Phi(p)] = \\ &= A \left(1 - \frac{K_{\dot{\theta}} \frac{W_1}{1 + W_1 W_{oc}} W_2}{1 + K_{\dot{\theta}} \frac{W_1}{1 + W_1 W_{oc}} W_2} \right) = \\ &= A \left(1 - \frac{K_{\dot{\theta}} W_1 W_2}{1 + W_1 W_{oc} + K_{\dot{\theta}} W_1 W_2} \right) = \\ &= A \left(\frac{1 + W_1 W_{oc} + K_{\dot{\theta}} W_1 W_2 - K_{\dot{\theta}} W_1 W_2}{1 + W_1 [W_{oc} + K_{\dot{\theta}} W_2]} \right) = \\ &= A \left(\frac{1 + W_1 W_{oc}}{1 + W_1 [W_{oc} + K_{\dot{\theta}} W_2]} \right) = \\ &= A \left(\frac{1 + K_{\omega z} \frac{T_{\omega z} p + 1}{T_0^2 p^2 + 2\xi_0 T_0 p + 1} \mu_z}{1 + \frac{T_{\omega z} p + 1}{T_0^2 p^2 + 2\xi_0 T_0 p + 1} \left[\mu_z + K_{\dot{\theta}} \frac{V}{57,3g(T_{\omega z} p + 1)} \right]} \right) = \\ &= A \frac{1 + K_{\omega z} \mu_z}{1 + \left[\mu_z + K_{\dot{\theta}} \frac{V}{57,3g} \right]} \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, статическая ошибка зависит как от параметров объекта управления (коэффициента усиления по угловой скорости тангажа $K_{\omega z}$), так и от коэффициента обратной связи по угловой скорости тангажа μ_z и обрат-

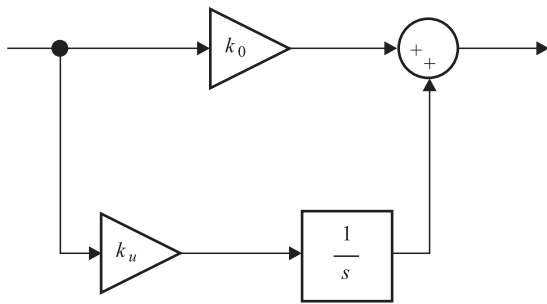


Рис. 6. Структурная схема ПИ-регулятора

но пропорциональна коэффициенту усиления в прямой цепи K_{θ} .

Введение в контур управления астатизма в виде интегрирующего звена приведёт к проблеме обеспечения устойчивости вследствие увеличения фазового запаздывания на 90° во всей области частот. Однако посредством пропорционально-интегрирующего корректирующего звена (ПИ-регулятора) задача сведения

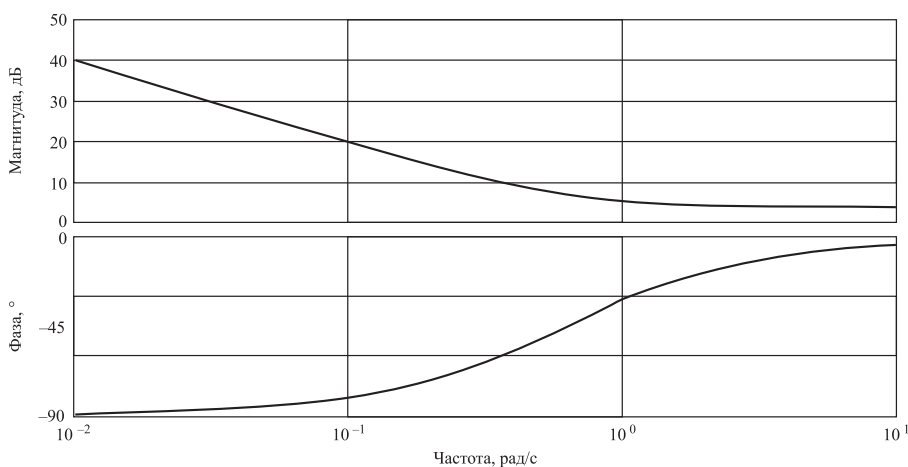


Рис. 7. Логарифмическая амплитудно-фазочастотная характеристика ПИ-регулятора

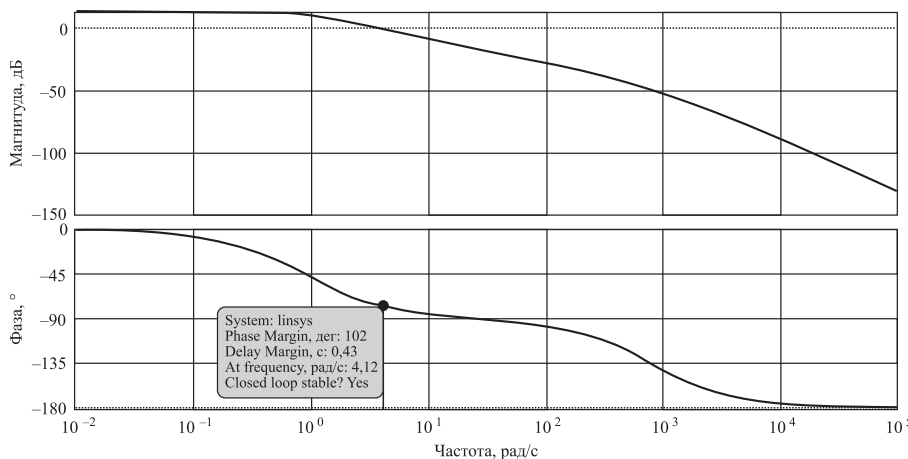


Рис. 8. Разомкнутая логарифмическая амплитудно-фазочастотная характеристика контура стабилизации при отсутствии ПИ-регулятора

к нулю статической ошибки может быть решена [3].

На рис. 6 показана структурная схема ПИ-регулятора.

Передаточная функция ПИ-регулятора представляет собой сумму пропорционального и интегрирующего звеньев:

$$W(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{k_u}{p} + k_0 = k_u \frac{Tp + 1}{p}, \quad (4)$$

$$\text{где } T = \frac{k_0}{k_u}.$$

Таким образом, при добавлении в контур стабилизации ПИ-регулятора получаем астатизм, сводящий к нулю статическую ошибку, а форсирующее звено в числителе позволяет при правильном выборе величины постоянной времени T сохранить исходные запасы устойчивости.

С точки зрения практической реализации удобно выбирать $k_u = 1$. В этом случае коэффициент усиления в прямой цепи не изменяется, а постоянная времени становится

равной коэффициенту усиления пропорционального звена $T = k_0$.

Логарифмическая амплитудно-фазочастотная характеристика ПИ-регулятора приведена на рис. 7. Из неё следует, что для минимизации его влияния на устойчивость контура стабилизации нормальной перегрузки частота $\omega = 1/T$ должна выбираться в области левее частоты среза контура стабилизации примерно на одну декаду, чтобы вносимое фазовое запаздывание было минимальным.

На рис. 8 приведена разомкнутая амплитудно-фазочастотная характеристика контура стабилизации при отсутствии ПИ-регулятора, а на рис. 9 — после его добавления. Видно, что запасы устойчивости по фазе практически не изменились, но появился астатизм (наличие наклона — 20 дБ/дек. в области малых частот).

При этом статическая ошибка в контуре стабилиза-

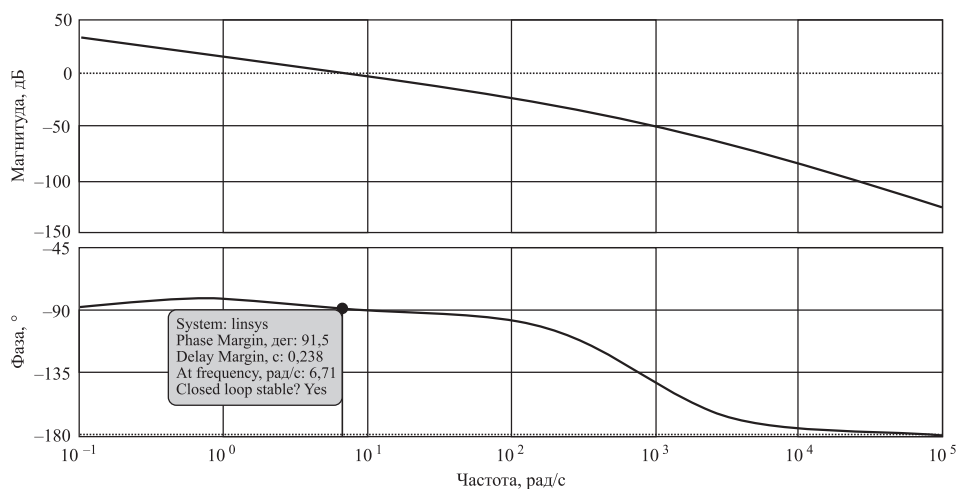


Рис. 9. Разомкнутая логарифмическая амплитудно-фазочастотная характеристика контура стабилизации с ПИ-регулятором

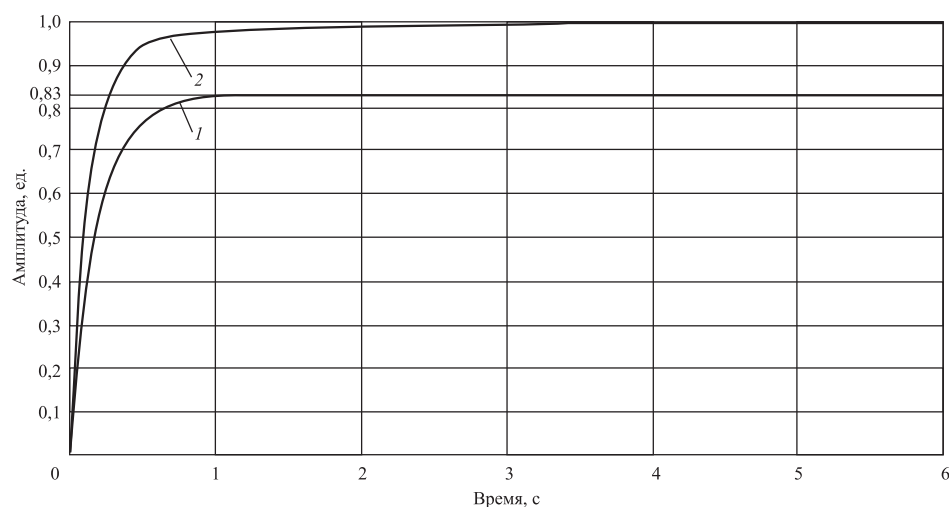


Рис. 10. Переходная характеристика контура стабилизации без ПИ-регулятора (1) и с ПИ-регулятором (2)

ции отсутствует, что иллюстрирует рис. 10, на котором приведены переходные процессы без и при наличии ПИ-регулятора соответственно.

Вывод. Метод повышения порядка астатизма системы стабилизации посредством добавления ПИ-регулятора является существенным фактором повышения её точности.

Библиографические ссылки

1. Лебедев А.А., Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965. 529 с.
2. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
3. Оболенский Ю.Г., Ермаков С.А., Сухоруков Р.В. Введение в проектирование систем авиационных рулевых приводов: учебное пособие для вузов. М.: Окружная газета ЮЗАО, 2011. 343 с.
4. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полёта беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1973. 616 с.
5. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолётов и ракет: справочник. М.: Машиностроение, 1982. 149 с.
6. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
7. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989. 304 с.
8. Никитин О.Ф. Гидравлика и гидропневмопривод. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 430 с.

Ссылка для цитирования

Оболенский Ю.Г., Крошкина А.А. Способ повышения точности системы стабилизации нормальной перегрузки // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 227—230.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 531.383.11

Т.В. Сазонова, д-р техн. наук, **М.С. Шелагурова**, канд. техн. наук, **Е.Г. Корнева**
(АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», г. Раменское Московской обл.)
marinashell@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПО ПОЛЮ РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлены результаты исследований методом математического моделирования режима экстремальной коррекции по полю рельефа земной поверхности при полёте летательного аппарата над пересечённой местностью. Проанализированы принципы работы радиовысотомера с широкой диаграммой направленности антенны при измерении высоты над пересечённой местностью и уточнены алгоритмы формирования оценок погрешности радиовысотомера. Исследованы алгоритмы предобработки эталонной информации о рельефе земной поверхности при полёте на больших высотах над пересечённой местностью.

Ключевые слова: экстремальная коррекция; рельеф земной поверхности; радиовысотомер; математическое моделирование.

The research results by the method of mathematical modeling of the mode of extreme correction in the field of the earth's surface relief at an aircraft flight over rough terrain are presented. The principles of a radio altimeter operation with a wide antenna pattern when measuring the height over rugged terrain are analyzed, and the algorithms for generating estimates of the radio altimeter error are refined. Algorithms for the preprocessing of reference information about the relief of the earth's surface during flight at high altitudes over rough terrain are investigated.

Keywords: extreme correction; relief of the earth's surface; radio altimeter; math modeling.

Корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) по рельефу земной поверхности (РЗП) известны с конца 1960-х гг. и являются в настоящее время единственными освоенными в промышленном производстве. Актуальность КЭНС по РЗП в условиях возможной постановки помех спутниковым навигационным системам (СНС) возросла, так как КЭНС обеспечивают автономность работы при нерасходящихся во времени ошибках определения навигационных параметров.

Особенностями РЗП, как навигационного поля, являются его высокая стабильность и живучесть, картографическая обеспеченность и удовлетворительная изученность работы бортового измерителя. В качестве основных статистических характеристик РЗП используются среднеквадратическое отклонение (СКО) и радиус корреляции рельефа (r_k). Результаты исследований статистических характеристик РЗП позволили условно разделить рельеф на три типа:

слабоинформативный рельеф (СКО рельефа в диапазоне от 10 до 20 м, $r_k > 5$ км);

среднеинформативный рельеф (СКО рельефа в диапазоне от 20 до 50 м, r_k в диапазоне от 1,5 до 5 км);

сильноинформативный рельеф (СКО рельефа > 50 м, $r_k < 1,5$ км).

Для целей экстремальной коррекции (ЭК), как правило, пригодным считается сильноинформативный и среднеинформативный рельефы. Использование слабоинформативного рельефа возможно только при соответствующем значении соотношения сигнал/шум, определяющим в конечном счёте точность экстремальной коррекции. Под сигналом в данном случае понимается информативность рельефа, характеризующаяся СКО рельефа, под шумом — совокупность ошибок измерения рельефа бортовыми датчиками и ошибок картографирования. Так, считается [1], что:

поле рельефа непригодно для навигации, если отношение сигнал/шум (σ_h/σ_d) $\sigma_h/\sigma_d \leq 1$;

слабое навигационное поле,

если $1 < \sigma_h/\sigma_d \leq 2$;

нормальное навигационное поле,

если $2 < \sigma_h/\sigma_d \leq 5$;

интенсивное навигационное поле,

если $\sigma_h/\sigma_d > 5$.

Таким образом, для обеспечения высокоточной экстремальной коррекции и глобальности навигации над сухопутной территорией необходимо снижать ошибки картографиро-

вания и повышать точность измерения поля рельефа на борту летательного аппарата (ЛА).

Для измерения геометрической высоты (от ЛА до поверхности земли) можно использовать радиотехнический, лазерный и акустический способы. В настоящее время в авиации наибольшее распространение получил радиотехнический способ измерения геометрической высоты с помощью радиовысотомеров. Вопросам построения радиовысотомеров, анализа отражённых сигналов при непрерывном и импульсном излучениях посвящено большое количество работ, в частности [2]. Облик датчика геометрической высоты определяется в каждом конкретном случае с учётом высоты применения ЛА и его геометрических размеров. В основном, для обеспечения измерения геометрической высоты при угловых эволюциях ЛА используются радиовысотомеры с широкой диаграммой направленности антенны (ДНА). Однако в этом случае с повышением высоты полёта увеличивается пятно засветки ДНА, что ставит под сомнение положительные результаты экстремальной коррекции по РЗП. В этой связи разработчики комплексов в технических заданиях стараются ограничить диапазон измерения геометрической высоты в режиме КЭНС до 2000 м, что в конечном счёте отрицательно влияет на тактику применения ЛА. Кроме того, выполнение данного ограничения в условиях полёта над явно выраженной горной местностью повлечёт за собой сниже-

ние безопасности полёта из-за возможности столкновения с земной поверхностью.

В данной статье приведены результаты обработки реальных данных радиовысотомера с широкой ДНА, полученных в ходе лётных испытаний при полёте ЛА над пересечённой местностью на высотах от 2000 до 4500 м, а также результаты математического моделирования режима КЭНС по РЗП с использованием этих данных и предложенных алгоритмов, направленных на повышение точностных характеристик КЭНС по РЗП.

В районе испытаний по интенсивности пересечённости местности выделялись три участка: 1-й и 2-й — среднепересечённый рельеф, 3-й — сильнопересечённый рельеф. Картографическая информация о РЗП была подготовлена на основе электронных карт формата SXF [3] масштаба 1:100 000. Ошибки радиовысотомера (РВ) оценивались следующим образом. По координатам СНС из карты выбирались значения РЗП (H_{et}). Из данных об абсолютной высоте, полученных после бароинерциальной фильтрации, вычитались измерения РВ (рис. 1—3). Затем находили разницу между эталонными значениями (H_{et}) и измеренными (H_{izm}) (рис. 4—6) значениями РЗП, а далее рассчитывались математическое ожидание (МО) и СКО полученных разниц. Из обработки исключались измеренные радиовысотомером высоты при углах эволюции более 30° (см. рис. 3, время полёта около 370 с).

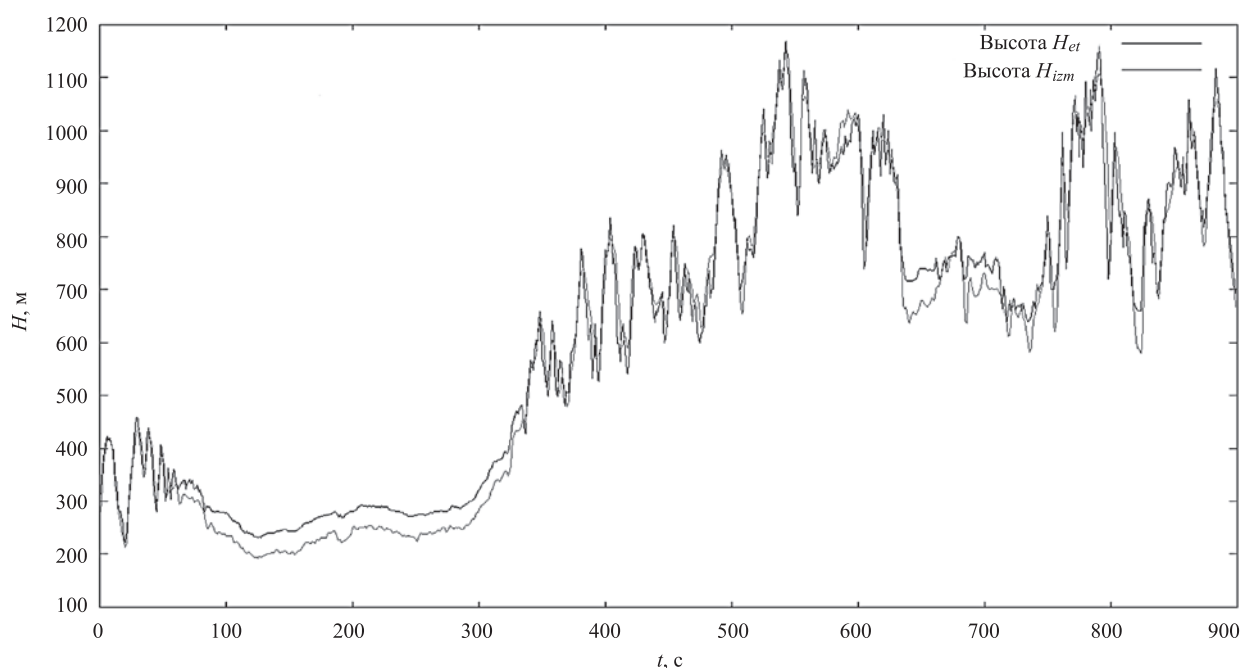


Рис. 1. График эталонных и измеренных значений РЗП 1-го участка

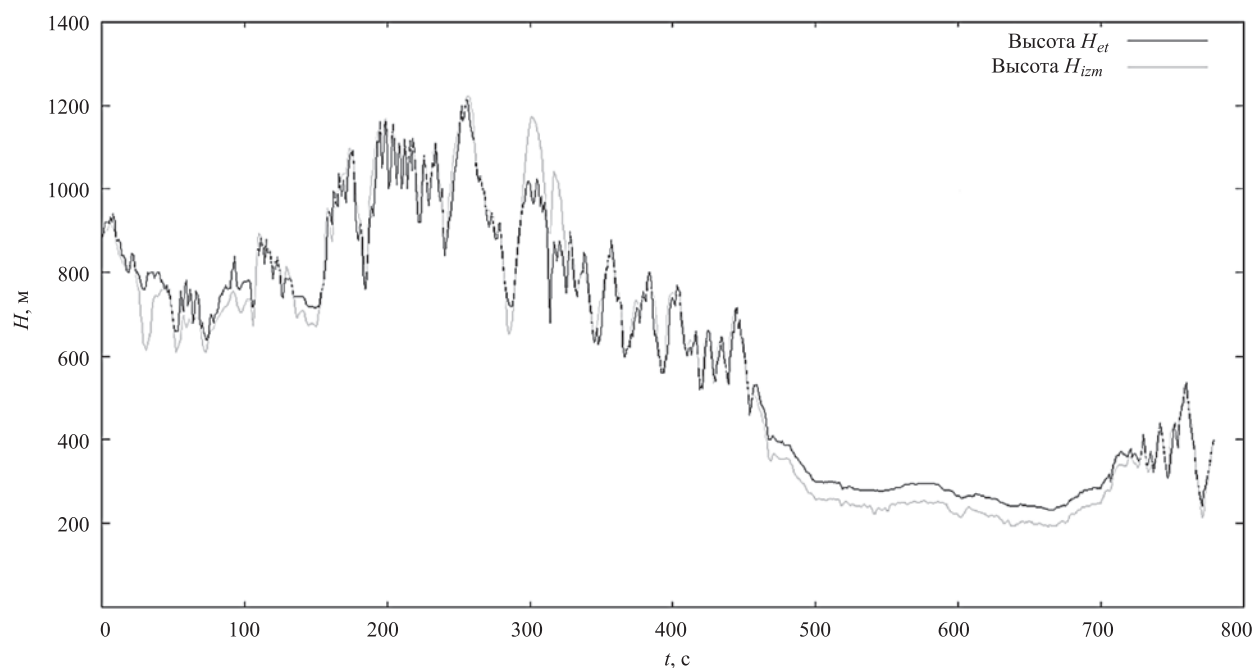


Рис. 2. График эталонных и измеренных значений РЗП 2-го участка

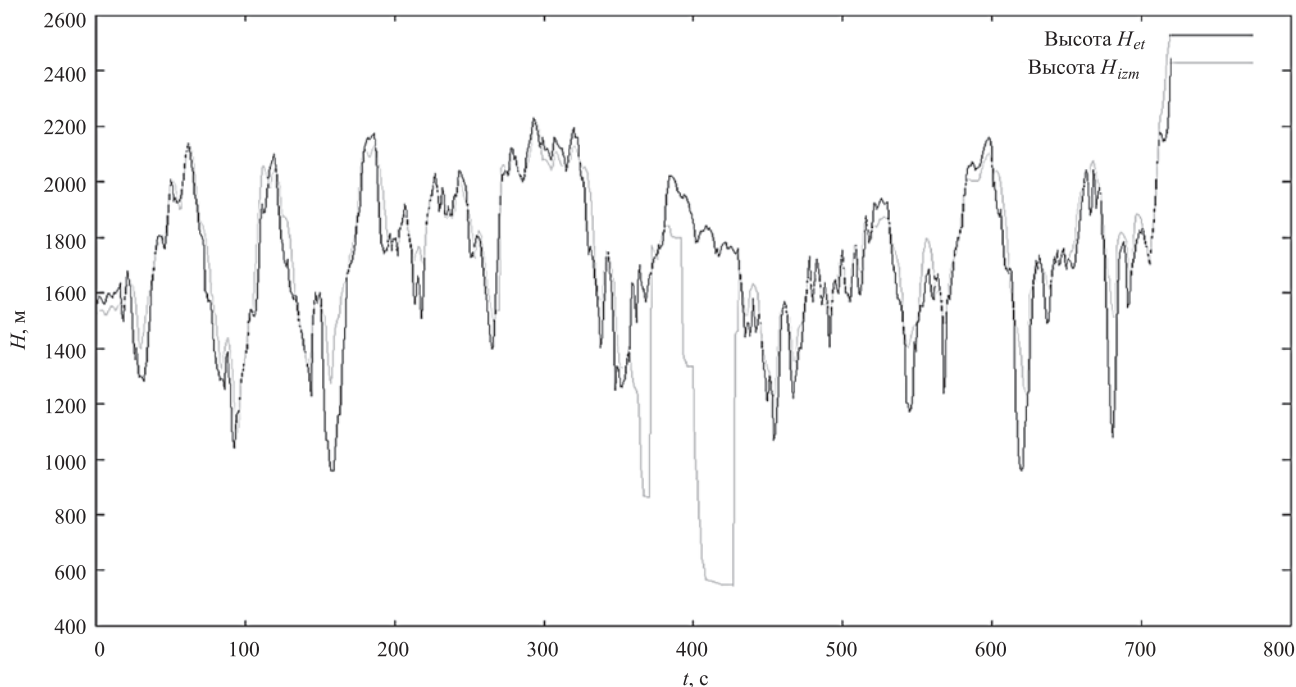


Рис. 3. График эталонных и измеренных значений РЗП 3-го участка

Следует отметить, что данная методика оценивает суммарную ошибку радиовысотомера и карты. По характеристикам масштаба 1:100 000 СКО ошибок карты по высоте в горной местности не превышает 20 м, что учитывалось при расчёте СКО ошибок РВ. Отношение сигнал/шум (С/Ш) находили как результат деления СКО РЗП на суммарное СКО ошибок.

В табл. 1 сведены результаты расчётов по оценке пригодности РЗП для ЭК, в том числе

рассчитанные систематическая и флюктуационная ошибки РВ при полёте над пересечённой местностью.

Анализ данных, приведённых на рис. 1—6 и в табл. 1, показывает, что ошибки РВ при полёте над явно выраженной горной местностью резко возрастают, что не позволяет считать РЗП в горах интенсивным навигационным полем.

Для выработки приемлемых решений по реализации режима КЭНС по РЗП над явно

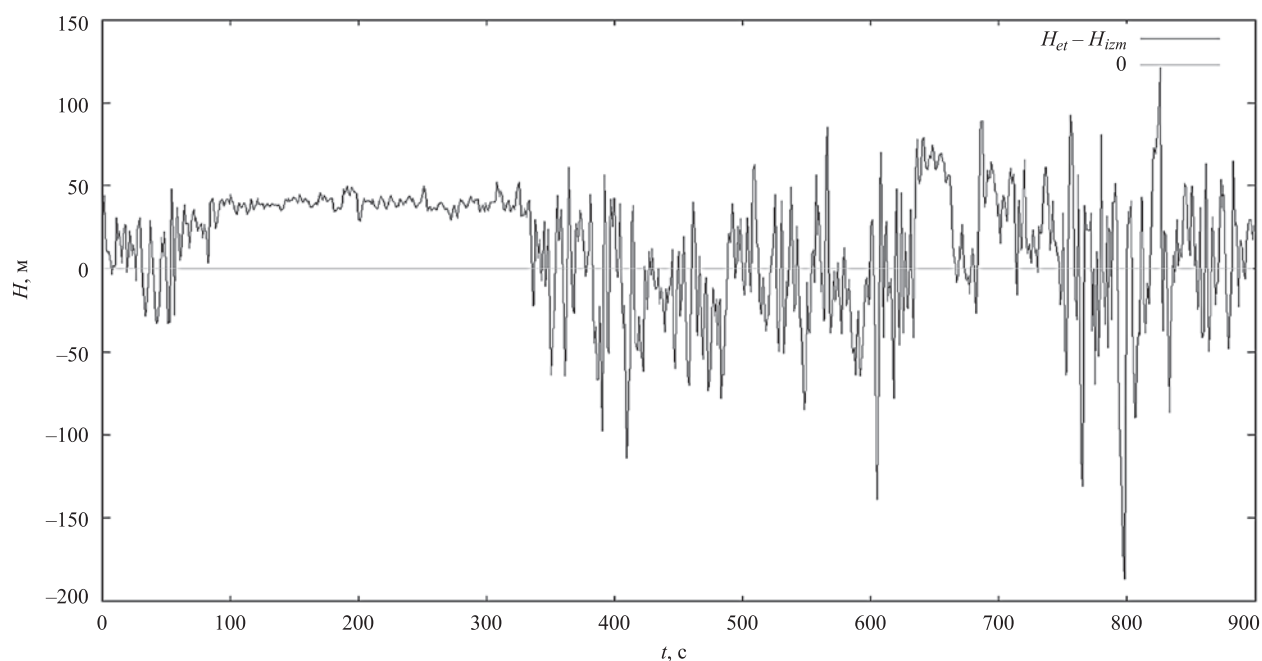


Рис. 4. График разницы эталонных (H_{et}) и измеренных (H_{izm}) значений РЗП для 1-го участка

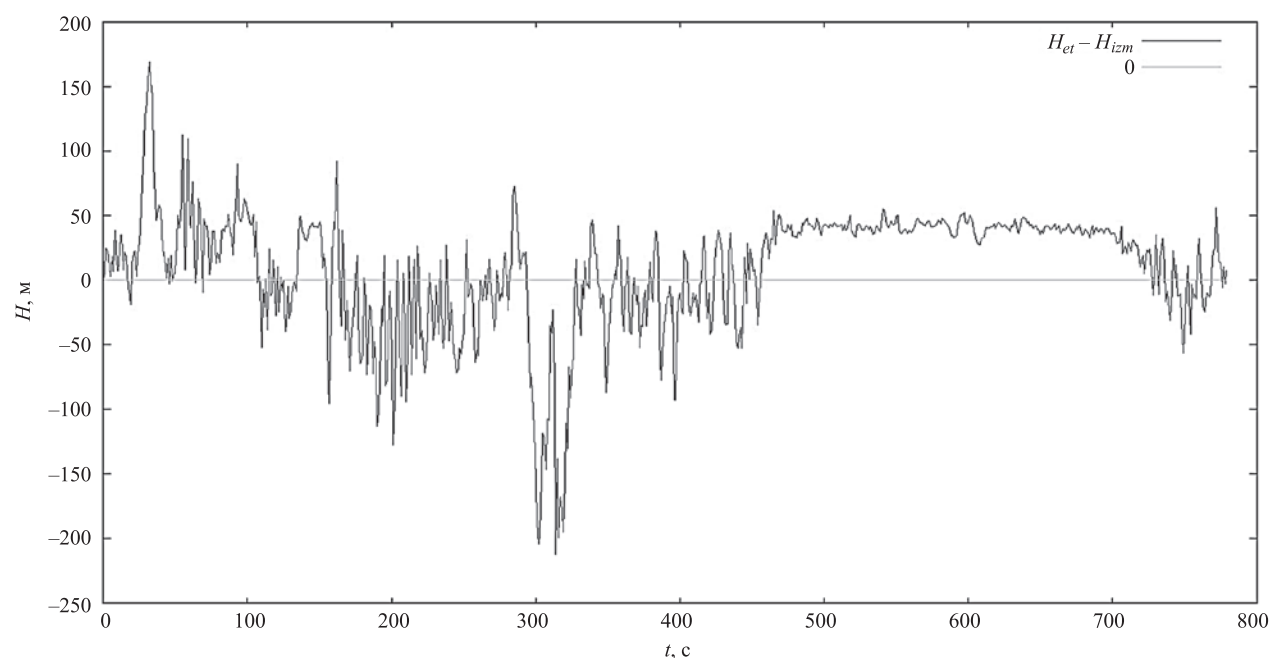


Рис. 5. График разницы эталонных (H_{et}) и измеренных (H_{izm}) значений РЗП для 2-го участка

Таблица 1

Результаты расчётов
по оценке пригодности РЗП для ЭК

Участок	МО ошибок РВ, м	Суммарное СКО/СКО ошибок РВ, м	СКО РЗП, м/ r_k , м	С/Ш
1	7,00	36,50/30,50	81,30/1780	2,23
2	-0,20	46,90/42,40	89,60/1730	1,91
3	-4,20	99,30/97,30	239,70/1731	2,41

выраженной горной местностью рассмотрим основные принципы работы РВ. Для импульсных радиовысотомеров с широкой диаграммой направленности антенны область облучаемой поверхности зависит как от ширины ДНА по уровню половинной мощности, так и от длительности импульса. На рис. 7 показан принцип облучения антенной РВ ДНА ровной и неровной поверхностей.

Как видно из рис. 7, оценка высоты смещается в сторону ближайшей от ЛА точки

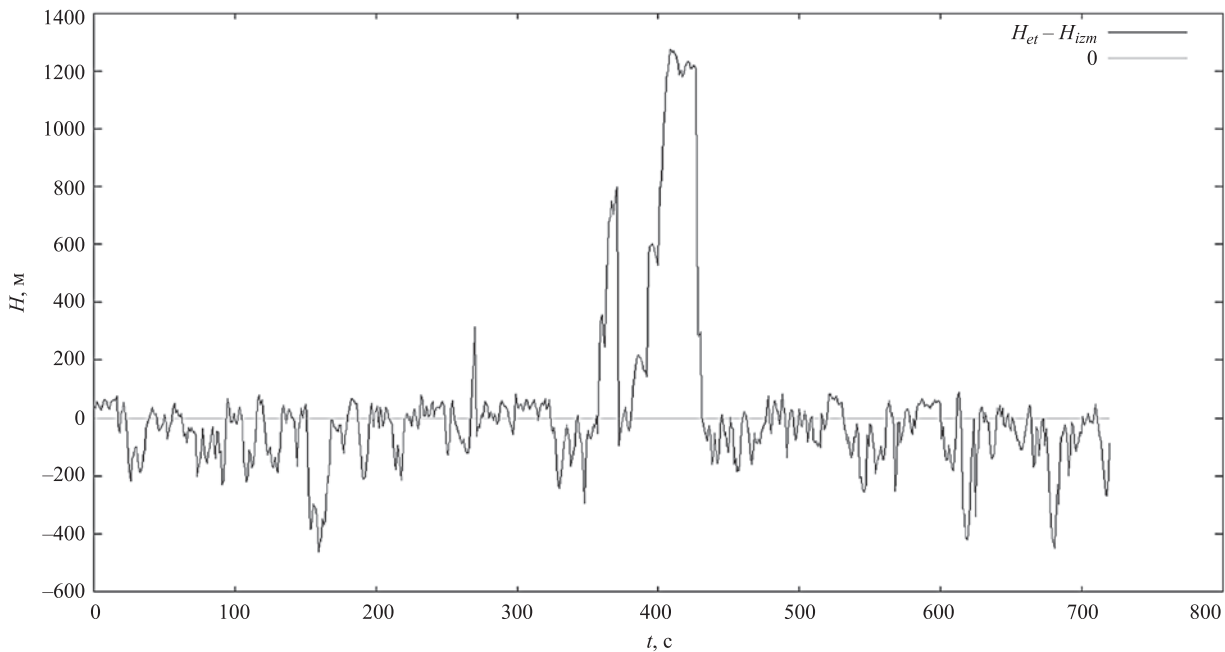


Рис. 6. График разницы эталонных (H_{et}) и измеренных (H_{izm}) значений РЗП для 3-го участка

рельефа, при этом происходит увеличение флюктуационной ошибки оценки высоты.

В зависимости от соотношения между длительностью импульса, высотой и шириной ДНА облучаемая поверхность ограничивается либо шириной ДНА, если

$$\frac{T_{et_2}}{2} < \arccos\left(\frac{1}{1 + Cti/2H}\right), \quad (1)$$

где T_{et_2} — ширина ДНА по уровню половинной мощности; C — скорость света $3 \cdot 10^8$ м/с; ti — длительность импульса,

либо длительностью импульса в противном случае.

При выполнении условия (1) на малых высотах радиус облучаемой поверхности R рассчитывается следующим образом:

$$R = H \tan \frac{T_{et_2}}{2}. \quad (2)$$

На больших высотах радиус облучаемой поверхности R рассчитывается по формуле [2]

$$R = \text{sqrt} \left[\left(C \frac{ti}{2} \right)^2 + HCti \right]. \quad (3)$$

Таким образом, упрощённую модель измерения РВ можно представить в виде расчёта расстояния до ближайшей точки рельефа

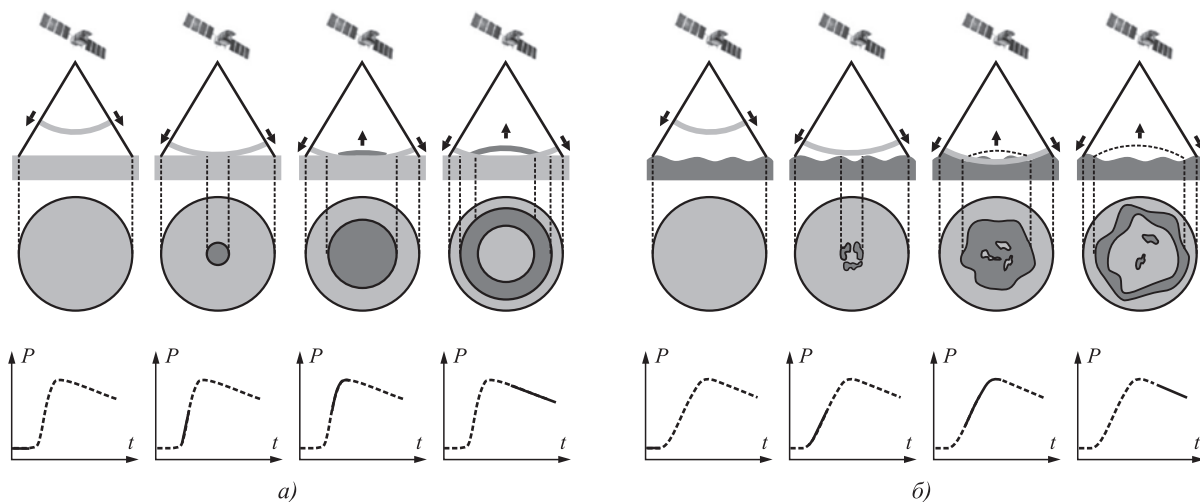


Рис. 7. Иллюстрация принципа облучения РВ ДНА ровной (а) и неровной (б) поверхностей

в пределах облучаемой поверхности. С учётом рассмотренных принципов работы РВ для повышения точностных характеристик КЭНС по РЗП на больших высотах целесообразно при формировании доверительного квадрата выбирать эталонное значение РЗП по кратчайшему расстоянию от ЛА до узла карты рельефа, находящегося в пределах радиуса облучаемой поверхности антенной РВ.

Далее приведён алгоритм предобработки эталонного значения РЗП на больших высотах:

а) найти все узловые точки карты рельефа в пределах облучаемой области, рассчитанной по формуле (3): $Z_i, X_i, H_{pi}, i = 1, \dots, I$;

б) рассчитать квадрат расстояния R_i от узловых точек рельефа до ЛА:

$$R_i^2 = (Z_i - Z_{la})^2 + (X_i - X_{la})^2 + (H_{la} - H_{pi})^2, \quad (4)$$

$i = 1, \dots, I$,

где H_{la} — значение бароинерциальной высоты;

в) выбрать минимальный квадрат расстояния узловых точек рельефа до ЛА R_{\min}^2 ;

г) сформировать эталонное значение РЗП: $H_k = H_{la} - \text{sqrt}(R_{\min}^2)$.

Кроме алгоритма предобработки эталонного значения РЗП на больших высотах предлагается также уточнить оценку СКО ошибок РВ при полёте над неровной поверхностью, информация о котором используется в расчёте необходимой длины зоны коррекции. Анализ технической документации на радиовысотометры показывает, что значения ошибок РВ приводятся для «ровной» поверхности. Занижение реальных ошибок РВ при расчётах длины зоны коррекции приводит к её уменьшению и, как следствие, к снижению точности и даже срыву режима КЭНС. Оценку ошибок РВ при полёте над неровной поверхностью предлагается проводить по следующему уточнённому алгоритму:

а) определить СКО ошибки РВ d_n за счёт неровности поверхности как функцию от СКО РЗП и отношения радиуса облучаемой поверхности к радиусу корреляции РЗП, т. е. как средние перепады высот в пределах половины пятна засветки ДНА:

$$d_n = \sigma_{rzp} R_{op} / r_k,$$

где R_{op} — радиус облучаемой поверхности; σ_{rzp} — СКО РЗП; r_k — радиус корреляции РЗП;

б) найти суммарную ошибку РВ σ_{rv} :

$$\sigma_{rv} = \text{sqrt}(s_{rvz}^2 + d_n^2),$$

где σ_{rvz} — значение флюктуационной ошибки по технической документации.

Таблица 2

Реальные и расчётные ошибки РВ

Участок	СКО РЗП, м/ r_k , м	СКО ошибок РВ по реальным данным, м	Расчётное СКО ошибок РВ, м
1	81,30/1780,00	30,50	38,00
2	89,60/1730,00	42,40	42,90
3	239,70/1731,00	97,30	113,80

В табл. 2 приведены значения флюктуационной ошибки РВ ДНА над неровной поверхностью, полученные после обработки реальных данных РВ и рассчитанные по уточнённому алгоритму формирования оценки СКО ошибок РВ. При расчёте приняты следующие параметры: геометрическая высота 2750 м, соответствующий ей размер облучаемой поверхности, равный 821 м, рассчитанный по формуле (3), СКО и радиусы корреляции РЗП из табл. 1.

Приведённые в табл. 2 расчётные ошибки РВ отличаются от реальных, однако они значительно ближе к приведённым в технической документации на РВ.

Оценка СКО ошибок РВ по реальным данным при использовании предобработки эталонной информации РЗП проводилась следующим образом. По формуле (3) определяли радиус облучаемой поверхности, по формуле (4) рассчитывали расстояния от ЛА, координаты которого определяли по данным СНС, до узла сетки РЗП, находящегося в пределах радиуса облучаемой поверхности, и выбирали минимальное расстояние R_{\min} . Затем находили разницу между R_{\min} и измеренными (см. рис. 8—10) значениями геометрической высоты H_{rvz} , а далее рассчитывали МО и СКО полученных разниц, при этом учитывали ошибки картографирования по высоте в горной местности ($\sigma = 20$ м). Из обработки исключались измеренные радиовысотометром высоты при углах эволюции более 30° (см. рис. 10, время полёта около 370 с).

Отношение С/Ш находили как результат деления СКО РЗП на суммарное СКО ошибок РВ и картографирования по высоте.

В табл. 3 сведены результаты по оценке ошибок РВ, а также пригодности РЗП для ЭК при предварительной обработке эталонных данных РЗП.

Сравнительный анализ результатов, приведённых в табл. 1 и 3, показывает, что предобработка эталонной информации о РЗП

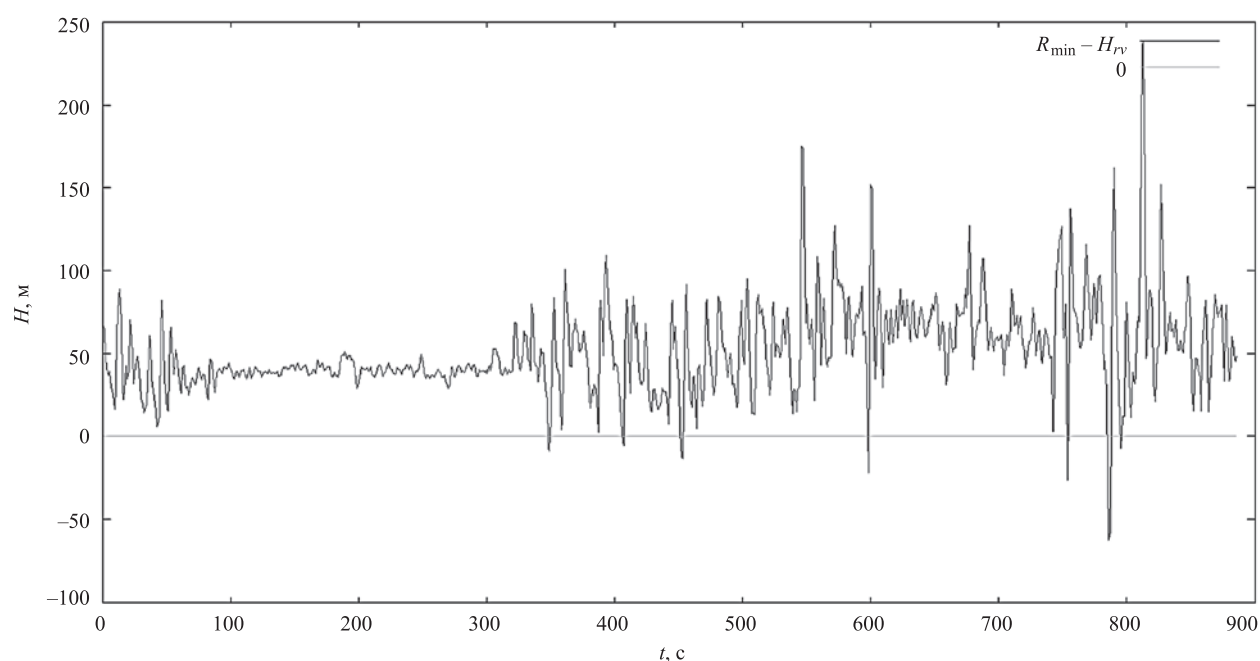


Рис. 8. График разницы между минимальным расстоянием (R_{\min}) и измеренными (H_{rv}) значениями геометрической высоты для 1-го участка

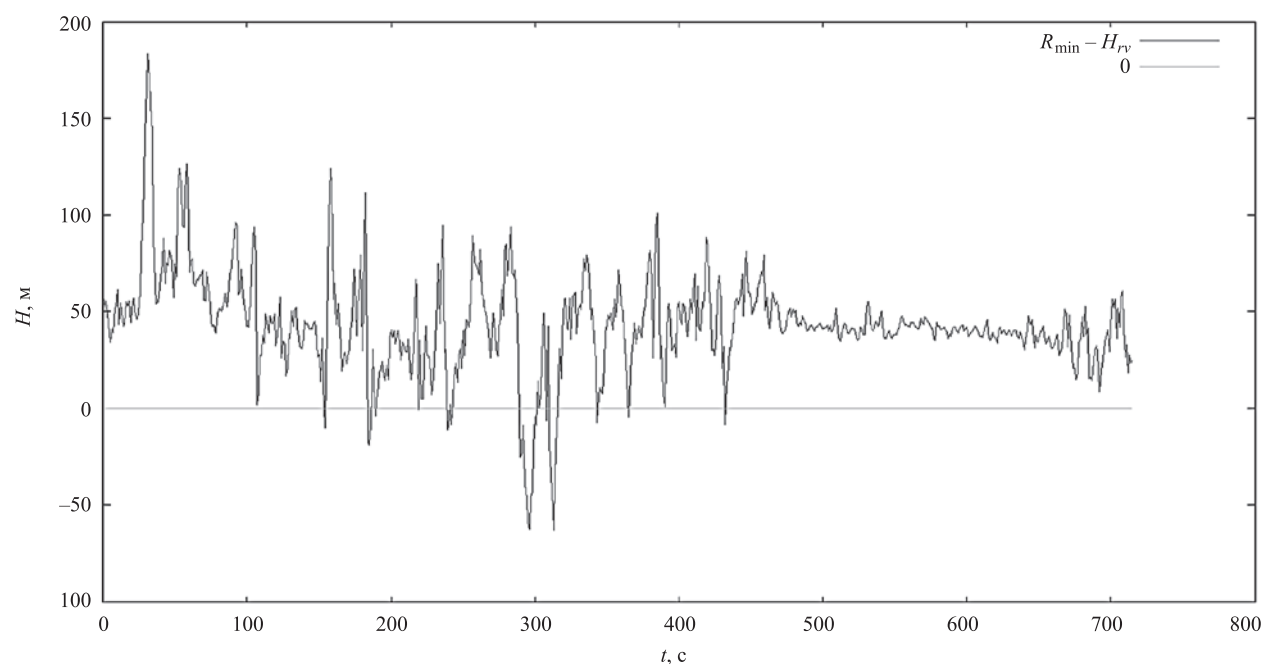


Рис. 9. График разницы между минимальным расстоянием (R_{\min}) и измеренными (H_{rv}) значениями геометрической высоты для 2-го участка

снижает ошибки измерения РЗП и тем самым повышает отношение сигнал/шум на всех участках района испытаний.

Несмотря на то, что предложенная модель РВ примитивна и не отражает всех физических процессов, протекающих при распространении и отражении радиоволн от горной поверхности, можно ожидать, что точностные характеристики КЭНС по РЗП повысятся при

использовании предобработки эталонной информации на больших высотах.

Целью дальнейшего математического моделирования режима КЭНС являлась оценка эффективности предлагаемых алгоритмов:

формирования ошибок РВ при полёте над неровной поверхностью;

предобработки эталонной информации РЗП на больших высотах.

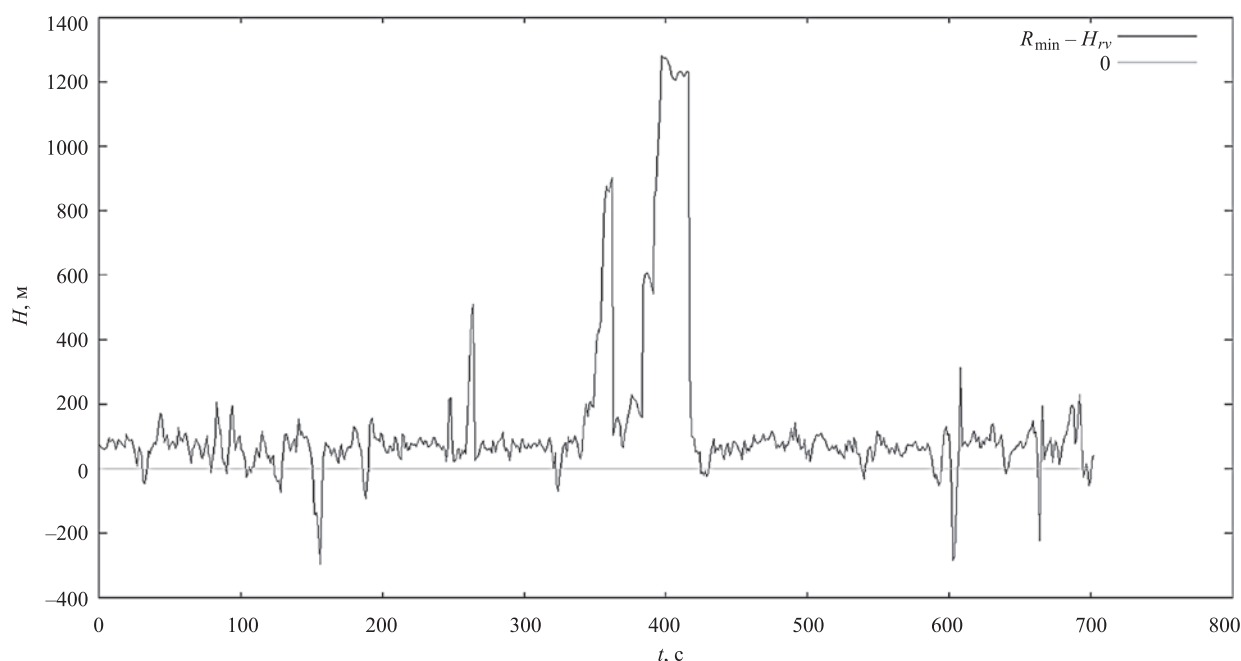


Рис. 10. График разницы между минимальным расстоянием (R_{\min}) и измеренными (H_{rv}) значениями геометрической высоты для 3-го участка

Таблица 3

**Оценка пригодности РЗП для ЭК
при предварительной обработке РЗП**

Участок	МО ошибок РВ, м	Суммарное СКО/СКО ошибок РВ, м	СКО РЗП/ r_k , м	С/Ш
1	53,90	25,00/15,00	81,30/1780,00	3,25
2	42,80	22,50/10,30	89,60/1730,00	4,00
3	64,60	49,00/44,70	239,70/1731,00	4,90

В табл. 4 сведены результаты математического моделирования режима КЭНС при алгоритме, учитывающем ошибки РВ, заданные для полёта над ровной поверхностью (вариант 1), и уточнённом алгоритме формирования ошибок РВ при полёте над неровной поверхностью (вариант 2). В табл. 4 приняты следующие обозначения: SKO_x , SKO_z — средне-квадратические отклонения погрешности ЭК по осям X и Z , $SKO_{\text{круг}}$ — круговая погрешность ЭК.

Анализ приведённых в табл. 4 результатов показывает, что уточнённый алгоритм формирования ошибок РВ за счёт учёта допол-

Таблица 4

Результаты исследований алгоритма формирования ошибок РВ

Участок	Расчёт ошибок РВ	SKO_x , м	SKO_z , м	$SKO_{\text{круг}}$, м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м
1	Вариант 1	294,80	451,90	539,5	7	6780,30
	Вариант 2	126,39	251,45	281,42	10	9345,46
2	Вариант 1	280,30	261,80	383,50	8	6117,30
	Вариант 2	109,69	170,02	202,33	7	9676,70
3	Вариант 1	140,00*	353,10*	—	1	10 811,80
	Вариант 2	264,58	237,17	355,32	12	9482,30

Примечание: *ошибки ЭК

нительных погрешностей РВ при полёте над неровным рельефом приводит к увеличению необходимой для ЭК длины зоны коррекции, что положительно сказывается на точности коррекции, а над явно выраженным горным рельефом увеличивает количество зон коррекций. Дальнейшее математическое моделирование режима КЭНС проводилось с использованием алгоритма по варианту 2.

Исследование эффективности алгоритма предобработки эталонной информации РЗП на больших высотах проводилось для рассматриваемых участков. Так как предобработка эталонной информации в соответствии с приведённым алгоритмом требует значительного количества вычислений, возрастающих с увеличением высоты полёта ЛА, то в ходе математического моделирования исследовался и более упрощённый алгоритм, состоящий

в выборе в качестве эталонного максимального значения РЗП в пределах облучаемой поверхности. В табл. 5—7 приведены результаты моделирования режима КЭНС для трёх участков полёта без предобработки эталонной информации РЗП, а также при предобработке в соответствии с предложенными усложнённым и упрощённым алгоритмами. В табл. 5—7 приняты следующие дополнительные обозначения: MO_x , MO_z — математические ожидания погрешности КЭНС по осям X и Z .

Анализ приведённых в табл. 5—7 данных показывает, что предобработка эталонной информации увеличивает точность режима КЭНС и количество коррекций, особенно при полёте над явно выраженным горным рельефом.

По сравнению с усложнённым алгоритмом предварительной обработки использова-

Таблица 5

Результаты моделирования режима КЭНС для 1-го участка

Обработка эталона РЗП	M_x , м	SKO_x , м	M_z , м	SKO_z , м	$SKO_{\text{круг}}$, м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м
Без предобработки	105,00	126,39	120,00	251,45	281,42	10	9345,46
Упрощённый алгоритм	88,64	123,11	75,00	221,56	253,47	11	10 234,23
Усложнённый алгоритм	103,85	80,77	23,08	103,53	131,31	13	9247,96

Таблица 6

Результаты моделирования режима КЭНС для 2-го участка

Обработка эталона РЗП	M_x , м	SKO_x , м	M_z , м	SKO_z , м	$SKO_{\text{круг}}$, м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м
Без предобработки	-12,50	109,69	-62,50	170,02	202,33	7	9676,70
Упрощённый алгоритм	-30,00	135,00	120,00	204,57	245,10	10	9119,31
Усложнённый алгоритм	0,10	58,09	-7,50	85,18	103,11	10	9196,02

Таблица 7

Результаты моделирования режима КЭНС для 3-го участка

Обработка эталона РЗП	M_x , м	SKO_x , м	M_z , м	SKO_z , м	$SKO_{\text{круг}}$, м	Число коррекций	Средняя длина коррекции, м
Без предобработки	25,00	264,58	25,00	237,17	355,32	12	9482,30
Упрощённый алгоритм	26,79	128,68	75,00	152,66	199,66	15	7031,77
Усложнённый алгоритм	25,81	122,28	75,00	109,79	164,33	16	7191,03

ние упрощённого алгоритма немного снижает точность КЭНС и количество коррекций. Однако если в бортовом вычислителе возникнут проблемы при реализации усложнённого алгоритма, использование упрощённого алгоритма предобработки позволит значительно повысить точность и количество коррекций КЭНС по сравнению с необработанными эталонными значениями РЗП.

Заключение. Предложенные алгоритмы формирования оценок ошибок РВ при полёте над неровным рельефом и предобработки эталонной информации на больших высотах увеличивают точность режима КЭНС и количество коррекций, особенно при полёте над явно выраженным горным рельефом.

Библиографические ссылки

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985.
2. Баас Ф.Г., Фукс И.М. Рассеивание волн от статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1982.
3. Система электронных карт. Подсистема хранения и выдачи данных. Векторный формат «SXF». Редакция 4.0. Структура данных в двоичном коде.

Ссылка для цитирования

Сафонова Т.В., Шелагурова М.С., Корнева Е.Г. Исследование режима экстремальной коррекции по полю рельефа методом математического моделирования с использованием результатов лётных испытаний // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 5. С. 231—240.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 25.02.2021.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 21.04.2021.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель