

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)
Булдакова 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., МГУПИ
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 технологий (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 — **Мымрина 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 74

10
2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Васильев И.И., Васильев М.И. Моделирование и управле-
ние вакуумом десорбера установки регенерации диэтилен-
гликоля при использовании контура автоматического управ-
ления, основанного на принципе нечёткой логики 435

Марков А.В., Орешина О.А. Автоматизация процесса при-
нятия решения о составе полимерных композиционных ма-
териалов 440

Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Контроль ме-
таллостеклянного спая пьезоэлектрических изделий 444

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Григорьев-Фридман С.Н. Новый взгляд на физические и
квантовые свойства фотона 448

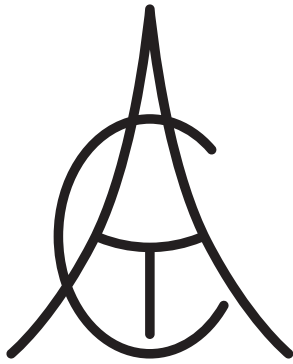
Севернов Б.В., Севернов В.В. Решение задачи классифи-
кации поверхностей методом решающих деревьев 458

**Ху Ц., Клычников В.В., Пролетарский А.В., Неусы-
пин К.А., Селезнева М.С.** Исследование БИНС низкой точ-
ности для беспилотной машины 463

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Зенкевич С.Л., Назарова А.В., Хо Ц. Логическое управле-
ние движением группы мобильных роботов в среде с препят-
ствиями 470

Деев Ф., Тимофеев А.Н. Управление мобильным роботом
в динамической среде с помощью нечёткой логики 476



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., MSUPI

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 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 74 $\frac{10}{2020}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Vasilyev I.I., Vasilyev M.I. Simulation and control of the desorber vacuum in a diethylene glycol regeneration facility using an automatic control loop based on the principle fuzzy logic 435

Markov A.V., Oreshina O.A. Automation of the decision-making process over the structure of polymer composite materials 440

Vasileva L.A., Boychuk M.I., Mikaeva S.A. Inspection of metal-to-glass junction of piezoelectric articles 444

MODERN TECHNOLOGIES

Grigorev-Fridman S.N. A new look at the physical and quantum properties of the photon 448

Severnov B.V., Severnov V.V. Solving the problem of surface classification by the decision tree method 458

Hu Ts., Klychnikov V.V., Proletarskiy A.V., Neusypin K.A., Selezneva M.S. Researching of the low-precision SINS research for an unmanned vehicle 463

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Zenkevich S.L., Nazarova A.V., Kho Ts. Logic control the movement of a mobile robots group in an environment with obstacles 470

Daef F., Timofeev A.N. Controlling a mobile robot in a dynamic environment using fuzzy logic 476



УДК 62-503.51

И.И. Васильев

(ООО «Газпром добыча Уренгой», г. Новый Уренгой),

М.И. Васильев

(ООО «Интер РАО — Управление электрогенерацией», г. Москва)

vasilyev.ivan.ivanovich@yandex.ru; misha462@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ВАКУУМОМ ДЕСОРБЕРА УСТАНОВКИ РЕГЕНЕРАЦИИ ДИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ОСНОВАННОГО НА ПРИНЦИПЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Смоделирован процесс управления вакуумом десорбера в установке регенерации диэтиленгликоля. Показана статическая характеристика зависимости разрежения в десорбере от мощности насоса. Разработана структурная схема контура автоматического управления вакуумом десорбера установки регенерации диэтиленгликоля. Выполнен сравнительный анализ методов автоматического управления процессом.

Ключевые слова: десорбер; регенерация; диэтиленгликоль; лингвистическая переменная; функции принадлежности.

The process of desorber vacuum control in a diethylene glycol regeneration facility is simulated. The static characteristic of the dependence of the vacuum in the desorber on the pump power is shown. The block diagram of the automatic control loop of the desorber vacuum in a diethylene glycol regeneration facility is developed. A comparative analysis of the process automatic control methods is carried out.

Keywords: desorber; regeneration; diethylene glycol; linguistic variable; membership functions.

Введение. Современные технические решения, принимаемые для модернизации установок комплексной подготовки газа (УКПГ), в состав которых входит установка регенерации диэтиленгликоля (ДЭГ), остаются приоритетными в связи с возросшим авторитетом газовой отрасли в мировой экономике. Основная задача отрасли, в которой используется высокотехнологичное оборудование, — обеспечение работы оборудования в бесперебойном и оптимальном режиме.

Создание системы автоматической оптимизации управления (САОУ) работой установки регенерации ДЭГ является важным, актуальным и перспективным техническим решением проблемы оптимальной работы. САОУ позволит переводить агрегат в рабочий режим максимально быстро и безопасно, поддерживать оптимальный режим работы установки, адаптироваться к внешним факторам, сохраняя оптимальный режим работы агрегата, а также производить плановый и аварийный останов агрегата.

В данной статье рассмотрена система управления контуром регулирования вакуума десорбера, основанная на принципе нечёткой

логики, с использованием теоретических методов исследований [1].

Основные проблемы и решения. Для обеспечения качественного процесса регенерации ДЭГ необходимо поддерживать заданное значение разрежения в десорбере, а в случае изменения параметров и количества подаваемого раствора на регенерацию необходимо регулировать разрежение в десорбере.

Основная проблема заключается в периодических изменениях технологического режима процесса регенерации, вследствие которых необходимо производить корректировку разрежения в десорбере.

В настоящее время операторы установки регенерации ДЭГ работают по режимной карте, и в случае изменения технологических параметров вручную изменяют мощность работы насоса. Ручное управление зачастую приводит к снижению качества процесса регенерации.

В данной работе предлагается рассмотреть реализацию контура автоматического управления разрежением в десорбере по необходимому заданию. Проведено моделирование управления методом нечёткой логики.

В качестве регулируемого параметра принимаем разрежение в десорбере, а в качестве управляющего параметра — заданную мощность циркуляционного насоса.

В режиме ручного управления была получена статическая характеристика объекта управления. График экспериментальной статической характеристики представлен на рис. 1.

Статическая характеристика является нелинейной и для получения её уравнения (расчётной линии регрессии) целесообразно использовать полином второй степени

$$Y(x_0) = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (1)$$

Расчёт коэффициентов проведён методом наименьших квадратов, основанным на соблюдении условия

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}(X_i))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где Y_i — экспериментальное значение; $\bar{Y}(X_i)$ — ордината линии регрессии при $X = X_i$; n — число экспериментальных точек.

Уравнение статической характеристики имеет вид

$$Y = 0,0026x^2 - 0,7243x - 0,8119. \quad (3)$$

Процесс характеризуется следующими полученными в ходе эксперимента динамическими параметрами: постоянная времени $T_{об} = 5$ с; время запаздывания $\tau_3 = 0,5$ с; средний коэффициент передачи объекта

$$\bar{K}_{об} = 0,7 \frac{\text{КПа}}{\text{Мощность насоса, \%}}.$$

В условиях действия множества случайных факторов, при наличии существенных нелинейных связей между параметрами процесса традиционные системы автоматического управ-

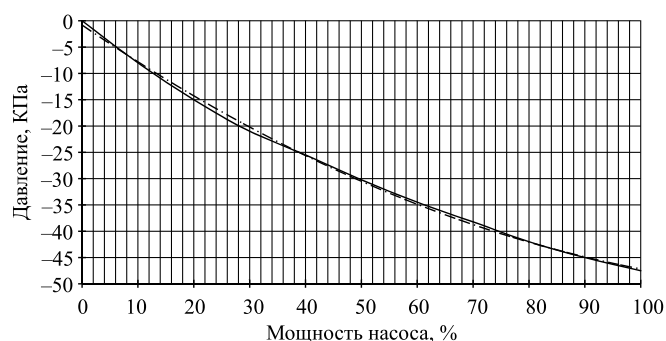


Рис. 1. Статическая характеристика зависимости разрежения в десорбере от мощности работы циркуляционного насоса:

— — статическая характеристика; - - - — аппроксимация статической характеристики полиномом второй степени

ления, основанные на типовых динамических моделях, не всегда могут справляться с задачами управления. Основной причиной этого является исходное для них предположение о линейности связи между параметрами процесса, что часто не соответствует реальным условиям.

В таких сложных условиях для управления процессом эффективнее использовать системы автоматического управления, принцип действия которых основан на теории нечётких множеств и нечёткой логике.

Нечёткое управление имеет преимущество перед широко используемыми типовыми системами автоматического управления за счёт замены используемой упрощённой количественной линейной модели управляющей системы нелинейной многосторонней лингвистической моделью, основанной на базе формализованной имитации и обобщении практического опыта, формирования управляющих воздействий экспертом (лучшим технологом оператором) в различных реальных производственных ситуациях.

Принцип работы нечётких автоматических систем основан на использовании лингвистической модели, составленной из логических правил, задаваемых в форме «Если есть ситуация, тогда нужно такое управление» [2].

Используя базу правил и методы синтеза нечётких алгоритмов управления, можно осуществлять автоматизацию и даже оптимизацию управления технологическими процессами без проведения всесторонних экспериментальных и математических исследований по созданию моделей управляемых процессов путём изменения базы логических правил управления в соответствии с изменением реальных условий [3].

Структурная схема системы автоматического регулирования вакуума в десорбере с использованием нечёткого управления представлена на рис. 2.

Текущее значение вакуума в десорбере измеряется датчиком и подаётся на элемент сравнения (ЭС). На выходе ЭС формируется сигнал рассогласования между текущим значением разрежения в десорбере и его заданным значением

$$\varepsilon(\tau) = Z(\tau) - Z_{зад}(\tau). \quad (4)$$

Сигнал рассогласования масштабируется в блоке K_1 и дифференцируется в блоке Д. На вход нечёткого регулятора (НР) подаются два нормированных сигнала

$$x_1 = K_1\varepsilon(\tau) \text{ и } x_2 = K_2 \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}. \quad (5)$$

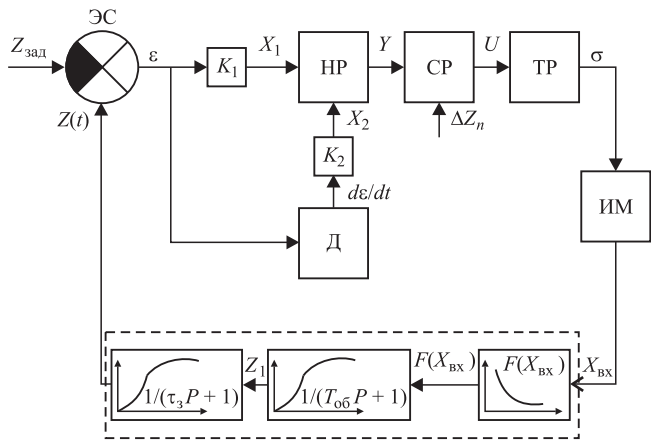


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования вакуума с использованием нечёткого управления

Формирование управляющего воздействия $Y(\tau)$ на выходе НР с использованием принципа нечёткого управления осуществляется следующим образом. Вводятся лингвистические переменные физических нормированных предметных величин: X_1 — рассогласование; X_2 — скорость рассогласования; Y — управляющее воздействие. Нормированные предметные величины X_1 и X_2 фиксируют по оси аргумента функций принадлежности. Нечёткое множество функций принадлежности $\mu(x_i)$ формируется с использованием выбранных технологически обоснованных функций, которые количественно характеризуют степень приближения значения предметной переменной к нечёткому множеству. Значение $\mu(x)$ фиксируется по оси функций [4].

В области определения предметной переменной X_1 использованы пять нечётких множеств $\mu(x_1)$, определяющих значение лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности $A_i^{X_1}$: $A_1^{X_1}$ — положительное большое; $A_2^{X_1}$ — положительное малое; $A_3^{X_1}$ — нулевое; $A_4^{X_1}$ — отрицательное малое; $A_5^{X_1}$ — отрицательное большое.

Аналогично определяем функции принадлежности $A_i^{X_2}$ для значений лингвистической переменной X_2 .

В общем случае вид функций принадлежности $\mu(x_i)$ и форма их представления могут быть произвольными. Но наибольшее применение получили так называемые «стандартные» функции принадлежности: Z-функции; Л-функции; S-функции; П-функции [5].

Применительно к рассматриваемому случаю выберем следующие функции принадлежности.

Используем S-функции для $A_i^{X_1}$, где $i = 1, \dots, 2$ в виде выражения

$$A_1^{X_1} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_1 > 1; \\ 1,25X_1 - 0,25, & \text{если } 0,2 \leq X_1 \leq 1; \\ 0, & \text{если } X_1 < 0,2. \end{cases} \quad (6)$$

Используем функции Л для представления $A_2^{X_1}, A_3^{X_1}, A_4^{X_1}$:

$$A_2^{X_1} = \begin{cases} -\frac{7}{5}X_1 + \frac{17}{10}, & \text{если } 0,5 \leq X_1 \leq 1; \\ \frac{10}{7}X_1 + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,2 \leq X_1 \leq 0,5; \\ 0 & \text{если } X_1 < -0,2; \end{cases} \quad (7)$$

$$A_3^{X_1} = \begin{cases} -1,25X_1 + 1, & \text{если } 0 < X_1 < 0,8; \\ 1,25X_1 + 1, & \text{если } -0,8 \leq X_1 \leq 0; \\ 0, & \text{если } X_1 > 0,8 \text{ или } X_1 < -0,8; \end{cases} \quad (8)$$

$$A_4^{X_1} = \begin{cases} -\frac{10}{7}X_1 + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,5 \leq X_1 \leq 0,2; \\ \frac{7}{5}X_1 + \frac{17}{10}, & \text{если } -1 \leq X_1 \leq -0,5; \\ 0, & \text{если } X_1 > 0,2. \end{cases} \quad (9)$$

Для отражения функций $A_5^{X_1}$ используем Z-функцию в виде

$$A_5^{X_1} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_1 < -1; \\ -1,25X_1 - 0,25, & \text{если } -1 \leq X_1 \leq -0,2; \\ 0, & \text{если } X_1 > -0,2. \end{cases} \quad (10)$$

Графические изображения функций принадлежности нечётких множеств $\mu(x_i)$ для входных переменных представлены на рис. 3.

Нечёткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i при $i = 1...5$: B_1 — положительное большое; B_2 — положительное малое; B_3 — нулевое; B_4 — отрицательное малое; B_5 — отрицательное большое.

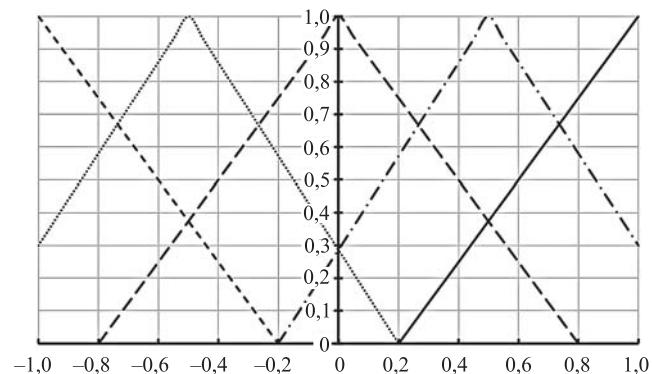


Рис. 3. Функции принадлежности нечётких множеств для входных переменных:

— — A_1 ; - · - · - A_2 ; - - - A_3 ; ····· A_4 ; - - - A_5

Нечёткие множества выходной лингвистической переменной представлены в виде вектора $B_i = [1; 0,5; -0,5; -1]$ при $i = 1...5$.

При формировании базы правил для реализации нечёткого управления принято основное эвристическое правило, определяющее стратегию качественного управления [6, 7], которое формулируется следующим образом: «Если возникает рассогласование $\varepsilon(\tau)$, тогда необходимо управляющее воздействие, обеспечивающее устранение возникшего рассогласования. При $\varepsilon(\tau) \leq \varepsilon_n$ процесс управления считать завершённым, если это состояние соблюдается в течение заданного интервала времени. Здесь ε_n — заданная зона нечувствительности системы нечёткого управления».

Функционирование системы управления разрежением в десорбере определяется следующей базой правил:

$$\begin{aligned} R_1: (X_1 = A_5^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_2: (X_1 = A_1^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \\ R_3: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_4: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_5: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_6: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \\ R_7: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_8: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_9: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_{10}: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_{11}: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Каждое правило логически характеризует реальную ситуацию и рекомендует соответствующее управляющее воздействие. Так, например, эвристическое правило R_1 можно сформулировать следующим образом: «Если скорость изменения рассогласования близка к нулю ($A_3^{X_2}$ = "Нулевое"), возникло большое отрицательное рассогласование между заданным и текущим значениями регулируемого параметра ($A_5^{X_1}$ = "Отрицательное большое"), то на выходе нечёткого регулятора должен быть сигнал, пропорциональный максимальному изменению мощности насоса в направлении, необходимом для увеличения значения регулируемого параметра B_5 = "Отрицательное большое».

Эвристическое правило R_3 формулируется так: «Если регулируемая величина немного больше задания ($A_4^{X_1}$ = "Отрицательное малое"),

а скорость изменения рассогласования близка к нулю ($A_3^{X_2}$ = "Нулевое"), то на выходе нечёткого регулятора формируется сигнал, пропорциональный небольшому изменению мощности насоса, обеспечивающему увеличение регулируемого параметра для устранения сигнала рассогласования B_4 = "Отрицательное малое».

Аналогичным образом формулируются остальные эвристические правила.

При формулировке базы правил обязательно следует учитывать два важных обстоятельства: условия формирования сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ на элементе сравнения ЭС и вид статической зависимости управляемого параметра от управляющего воздействия.

На выходе НР с использованием алгоритма нечёткой логики формируется управляющий сигнал $Y(\tau)$, подаваемый на вход логического элемента сигнум-реле (СР). На выходе СР формируется управляющий сигнал $U(\tau)$ в соответствии с условием

$$U(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(\tau) > \frac{\Delta Y_n}{2}, \text{ при } \varepsilon(\tau) < 0 - \\ & \text{уменьшить разрежение;} \\ 0, & \text{если } \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right) \leq Y(\tau) \leq \frac{\Delta Y_n}{2}; \\ -1, & \text{если } Y(\tau) < \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right), \text{ при } \varepsilon(\tau) > 0 - \\ & \text{увеличить разрежение,} \end{cases} \quad (12)$$

где ΔY_n — заданная зона нечувствительности системы нечёткого управления; $U(\tau) \in (+1, 0, -1)$ — переключающая функция, определяющая текущее направление движения исполнительного механизма (ИМ).

Исполнительный механизм функционирует в соответствии с выражением

$$x_{\text{вх}}(\tau) = x_{\text{вх}}(\tau - 1) + U(\tau) \bar{K}_{\text{им}} \tau_d, \quad (13)$$

где $x_{\text{вх}}(\tau)$ — текущее положение ИМ; $x_{\text{вх}}(\tau - 1)$ — положение ИМ в предыдущий момент времени; $\bar{K}_{\text{им}}$ — средняя скорость ИМ; τ_d — время дискретизации системы регулирования.

Рассмотрим пример формирования управляющего воздействия $Y(\tau)$ при реализации нечёткого управления разрежением в десорбере установки регенерации диэтиленгликоля.

Допустим, что в начальный момент времени $\tau = 0$ процесс находится в неустановившемся состоянии при условиях: давление (разрежение) — 30,2 КПа; мощность насоса 50 %.

Система управления характеризуется следующими параметрами: заданное значение разрежения $Z_{зад}(\tau) = 20$ КПа; постоянная скорость перемещения исполнительного механизма $\bar{K}_{им} = 5\%$ мощности насоса/с; постоянная времени $T_{об} = 5$ с; время запаздывания $\tau_3 = 0,5$ с; средний коэффициент передачи объекта $\bar{K}_{об} = 0,7 \frac{\text{КПа}}{\text{Мощность насоса, \%}}$; величина зоны нечувствительности сигнум-реле $\Delta Y_n = 0,1$.

Дискретность расчёта переходного процесса в контуре нечёткого управления τ_d принимаем равной 0,1 с. При синтезе нечёткого регулятора величины нормирующих масштабных коэффициентов K_1 и K_2 приняты равными -40 и -20 соответственно.

В момент времени $\tau = 0$ с процесс характеризовался следующими параметрами:

$$F(X_{вх}) = Z_1 = Z = -30,2;$$

$$\frac{dZ_1}{d\tau} = \frac{dZ}{d\tau} = 0;$$

$$\varepsilon(\tau) = Z(\tau) - Z_{зад}(\tau) = -30,2 + 20 = -10,2;$$

$$\varepsilon = Z - Z_3 = Z = -30,2;$$

$$X_1 = \frac{\varepsilon}{K_1} = \frac{-10,2}{-40} = 0,255; X_2 = \frac{d\varepsilon/d\tau}{K_2} = \frac{0}{-20} = 0.$$

Используя зависимости, приведённые на рис. 3, определяем значения функций принадлежности для каждого нормированного предметного информационного сигнала $A_i^{x_1}$ и $A_i^{x_2}$ при $X_1 = 0,255$; $X_2 = 0$ (см. рис. 3):

$$A_1^{x_1} = 0,075; A_2^{x_1} = 0,7; A_3^{x_1} = 0,675;$$

$$A_4^{x_1} = 0; A_5^{x_1} = 0;$$

$$A_1^{x_2} = 0; A_2^{x_2} = 0,28; A_3^{x_2} = 1;$$

$$A_4^{x_2} = 0,28; A_5^{x_2} = 0.$$

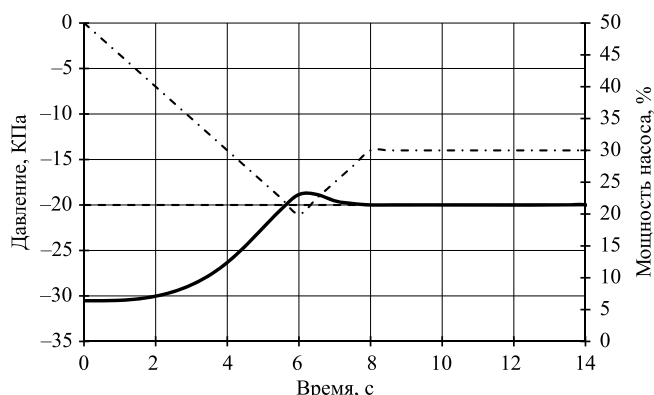


Рис. 4. Переходный процесс системы регулирования: — — — — давление, КПа; — — — — задание; — — — — мощность насоса, %

Затем определяем уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции минимум) в соответствии с базой правил

$$\begin{aligned} \mu_1^p &= \min(A_5^{x_1}; A_3^{x_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_2^p &= \min(A_1^{x_1}; A_3^{x_2}) = \min(0,075; 1) = 0,075; \\ \mu_3^p &= \min(A_4^{x_1}; A_3^{x_2}) = \min(0; 1) = 0; \\ \mu_4^p &= \min(A_2^{x_1}; A_3^{x_2}) = \min(0,7; 1) = 0,7; \\ \mu_5^p &= \min(A_4^{x_1}; A_4^{x_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_6^p &= \min(A_2^{x_1}; A_2^{x_2}) = \min(0,7; 0,28) = 0,28; \\ \mu_7^p &= \min(A_4^{x_1}; A_2^{x_2}) = \min(0; 0,28) = 0; \\ \mu_8^p &= \min(A_2^{x_1}; A_4^{x_2}) = \min(0,7; 0,28) = 0,28; \\ \mu_9^p &= \min(A_3^{x_1}; A_4^{x_2}) = \min(0,675; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{10}^p &= \min(A_3^{x_1}; A_2^{x_2}) = \min(0,675; 0,28) = 0,28; \\ \mu_{11}^p &= \min(A_3^{x_1}; A_3^{x_2}) = \min(0,675; 1) = 0,675. \end{aligned} \tag{14}$$

Далее определяем чёткое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) в соответствии с выражением

$$Y = \sum_{i=1}^{11} \mu_i^R / \sum_{i=1}^{11} \mu_i^P = 0,3576. \tag{15}$$

Поскольку $0,3576 > \Delta Y_n(0,1)$, то мощность насоса начинает уменьшаться, тем самым уменьшая разрежение на десорбере. Расчётные траектории переходного процесса системы регулирования на основе нечёткой логики представлены на рис. 4.

Из графика (см. рис. 4) видно, что время регулирования составляет $\tau_{p1} = 5,5$ с, $\tau_{p2} = 7$ с, а значит, система управления, основанная на нечёткой логике, достаточно быстро действует.

Достоинством регуляторов, основанных на нечёткой логике, является не только их быстрое действие, но и возможность поддержания определённой траектории выхода на задание.

Заключение. Смоделированная система управления разрежением в десорбере показала качественное регулирование данным технологическим процессом. Значимость системы регулирования, основанной на нечёткой логике, заключается в том, что режим управления разрежением в десорбере установки регенерации ДЭГ оказывает влияние на качество регенерации, сохранность технологических агрегатов и на экологические условия работы установки. Внедрение данной системы управления позволит повысить КПД устано-

вок регенерации ДЭГ и снизить его выбросы в атмосферу и промышленные стоки.

Библиографические ссылки

1. **Парсункин Б.Н., Васильев М.И.** Энергосберегающее нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2014. С. 81—90.

2. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход: научное пособие. М.: Изд. дом «Вильямс», 2010. 408 с.

3. **Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М.** Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 4 (36). С. 69—73.

4. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.

5. **Dadios E.P.** (ред.) Fuzzy Logic — Algorithms, Techniques and Implementations. Хорватия, Риека: Изд-во «InTech», 2012. 294 с.

6. **Syropoulos A.** Theory of Fuzzy Computation. США, Нью-Йорк: Изд-во «Springer», 2014. 170 с.

7. **Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: «Горячая линия — Телеком», 2004. 452 с.

Ссылка для цитирования

Васильев И.И., Васильев М.И. Моделирование и управление вакуумом десорбера установки регенерации диэтиленгликоля при использовании контура автоматического управления, основанного на принципе нечеткой логики // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 435—440.

УДК 62-5

А.В. Марков, д-р техн. наук, проф., **О.А. Орешина**

(Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург)

markov-av@mail.ru, olga_oresh@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О СОСТАВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена автоматизации процесса получения оптимального состава полимерного композиционного материала. При исследовании использованы методы системного анализа и методы проектирования систем поддержки принятия решений. Разработана структура автоматизированной системы поддержки принятия решений о составе новых полимерных композиционных материалов. Осуществлена программная реализация её базовых функций.

Ключевые слова: оптимизация; структура системы поддержки принятия решений; математическая модель; полимерный композиционный материал.

The article is devoted to the automation of the obtaining process the optimal structure of the polymer composite material. When researching methods of system analysis and methods of designing, decision support systems are used. The automated decision support system over the structure of new polymer composite materials is developed. The software implementation of its basic functions is realized.

Keywords: optimization; structure of the decision support system; mathematical model; polymer composite material.

Введение. Стратегия инновационного развития на период до 2020 года, утверждённая распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2011 г. № 2227-р, предопределяет широкое применение новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в промышленности, в том числе в такой стратегически важной отрасли, как аэрокосмическая. В данной отрасли ПКМ могут использоваться в качестве многофункциональных радиотехнических материалов, с применением которых возможно решение вопросов электромагнитной

совместимости бортового оборудования и его защиты от несанкционированного воздействия электромагнитного излучения [1].

Разработкой подобных материалов занимаются как крупные научно-исследовательские институты Российской Федерации, так и предприятия малого бизнеса. При создании новых ПКМ возникает необходимость снижения себестоимости их создания. Это может быть достигнуто автоматизацией процесса принятия решения о составе ПКМ. Система поддержки принятия решения о составе и технологиче-

ских режимах синтеза ПКМ должна являться интерактивной автоматизированной системой, которая помогает исследователям применять данные и модели для решения слабоструктурированных задач выбора оптимального состава и технологических режимов синтеза ПКМ.

Структура автоматизированной системы поддержки принятия решения. При разработке структуры автоматизированной системы поддержки принятия решения рассмотрено только техническое прогнозирование, включающее в себя следующие этапы: моделирования и оптимизации, анализа результатов, синтеза вариантов, оценки рисков, являющееся основой подготовки к принятию решения. Это обусловлено необходимостью оценивать поведение ПКМ конкретного состава, полученного при определенных содержаниях компонентов и режимах синтеза [2].

Структура системы поддержки принятия решения о составе и технологических режимах синтеза ПКМ, базирующаяся на алгоритмах, реализующих математические модели (ММ) вида «состав ПКМ — свойства ПКМ» и «технологические режимы синтеза ПКМ — свойства ПКМ», с оценкой риска (с обработкой результатов опроса эксперта) при оптимизации состава ПКМ и технологических режимов синтеза представлена на рис. 1.

Интерфейс системы поддержки принятия решения о составе и технологических режимах синтеза ПКМ предполагает возможность ввода пользователем исходных данных, а именно: числа компонентов и ограничений; уравнений, задающих ограничения; числа показателей качества, автоматически влияющих на число уступок.

База данных содержит информацию об известном соотношении компонентов материалов и соответствующих данному соотношению значениях функций отклика по определенным показателям качества.

Блок вычислений реализует возможность получения как линейной математической мо-

дели (расчёт проводится на основе полного факторного эксперимента — ПФЭ), так и нелинейной математической модели (симплекс-решётчатое планирование с ограничениями с дополнительными вычислениями коэффициентов регрессии в программе Minitab).

Экспертный блок реализует выбор альтернативного значения из предложенных экспертами вариантов величин уступок. Число экспертов определяется разработчиком ПКМ в соответствии с методикой, приведенной в работе [3].

Блок выдачи решений предполагает вывод результатов оптимизации. Таким образом, выводится оптимальное соотношение компонентов, необходимое для создания нового материала с наилучшими значениями заданных разработчиком показателей качества.

Алгоритм функционирования системы поддержки принятия решения. На первом этапе осуществляется ввод исходных данных пользователем. После этого происходит выбор математических моделей (линейных либо нелинейных). Расчёт коэффициентов для нелинейной математической модели осуществляется по формуле (запись в матричной форме) [4]

$$B = (F^T F)^{-1} F^T Y,$$

где B — вектор искоемых коэффициентов; F — матрица плана эксперимента; Y — столбец экспериментальных значений зависимой переменной.

Расчёт коэффициентов регрессии b_i ПФЭ производится по формуле [5, 6]

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i,$$

где N — число опытов; y_i — значения функции отклика; x_i — составляющие композиции.

После получения необходимых математических моделей решается задача выбора величин уступок. При решении задачи многокритериальной оптимизации для сведения возможных ошибок к минимуму при назначении величины уступки выбран критерий Сэвиджа. Данный критерий позволяет минимизировать последствия принятия неправильной величины уступки, что вполне вероятно в условиях неопределённости (неполноты информации о возможных значениях уступок).

Программная реализация системы поддержки принятия решения. Обзор реестра свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности (ФИПС) [https://www.fips.ru/] пока-

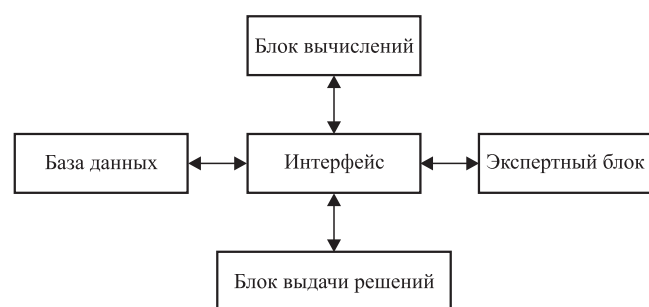


Рис. 1. Структура системы поддержки принятия решений

зал отсутствие аналогов такого программного обеспечения. В связи с этим целесообразна разработка данного программного обеспечения.

Программная реализация структуры системы поддержки принятия решения о составе и технологических режимах синтеза ПКМ возможна с использованием языка программирования Java в среде разработки IntelliJ Idea. Работа программы по поиску оптимального состава ПКМ иллюстрируется на примере материалов на основе силиконовых эластомеров. В качестве матрицы рассмотрен силиконовый каучук типа СКТН А (компонент x_1), наполнителями являются порошковые оксид железа (x_2) и гидроксид алюминия (x_3), последним компонентом (x_4) является присадка полиметилсилоксана типа ПМС-50.

Экранная форма интерфейса программного обеспечения с введёнными исходными данными приведена на рис. 2.

В качестве трёх характеристик (показателей качества) выбраны твёрдость по Шору, предел прочности при растяжении и относительное удлинение при растяжении. Число уступок составляет 2 (меньше числа показателей качества на единицу). На вкладке «Получение математической модели» пользователю предоставляется возможность выбора как линейной, так и нелинейной модели. При установке флажка на «ММ на основе симплексного метода» перед

Рис. 2. Задание исходных данных для расчётов

Рис. 3. Выбор нелинейной математической модели

пользователем возникает рекомендация о запуске программы Minitab (рис. 3).

При установке флажка на «ММ на основе ПФЭ» возникает рекомендация о переходе на следующую вкладку (рис. 4).

При выборе построения линейной математической модели пользователю необходимо ввести число уровней варьирования и функций отклика (рис. 5).

Предусмотрена возможность вывода на экран табличного значения коэффициента Кохрена. С помощью критерия Кохрена определяют справедливость гипотезы однородности (равенства) дисперсий, характеризующей воспроизводимость опытов в проведенном эксперименте [7]. Статистикой критерия является соотношение

$$G_{\text{расч}} = \frac{\max S_y^2}{\sum_{i=1}^N S_{yi}^2},$$

где S_y^2 — дисперсия воспроизводимости; N — число функций отклика.

Дисперсия воспроизводимости вычисляется по формуле

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{\text{ср}})^2,$$

где $y_i - y_{\text{ср}}$ — разница между значением функции отклика и средним арифметическим значением.

Рис. 4. Выбор построения линейной математической модели

Рис. 5. Пример ввода данных для получения линейной модели

Критическое значение $G_{кр}$ находится по таблице распределения Кохрена по числу степеней свободы числителя (на единицу меньше значений функций отклика), знаменателя f_2 (число опытов) и уровню значимости q (принимается равным 0,05). Это значение и выводится на экран по требованию пользователя. При выполнении условия $G_{расч} < G_{кр}$, гипотеза об однородности дисперсий признается верной, опыты являются воспроизводимыми.

На следующей вкладке «Уступки» (рис. 6) пользователю предоставляется возможность выбора числа экспертов, участвующих в назначении величин уступок.

На экран выводятся значения уступок, применяемые в дальнейших расчётах по оптимизации.

Нажатием кнопки «Получить соотношения» на вкладке «Оптимизация» (рис. 7) на экран выводится соотношение компонентов, при котором достигаются наилучшие значения показателей качества.

Рис. 6. Получение значений уступок

Рис. 7. Результаты оптимизации

Из рис. 7 следует, что для получения нового ПКМ с наилучшими значениями характеристик необходим следующий состав компонентов: x_1 — 25 %, x_2 — 38 %, x_3 — 37 %, x_4 — 0. Для подтверждения адекватности предлагаемых моделей и алгоритмов, которые применяются в системе поддержки принятия решения, были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях.

Заключение. Авторами разработано специальное программное обеспечение, реализующее функцию поддержки принятия решения о составе и технологических режимах синтеза новых ПКМ. Применение разработанного программного обеспечения позволяет автоматизировать и оптимизировать процесс выбора содержания компонентов, что, в свою очередь, позволяет снизить себестоимость разработки нового ПКМ и риск утверждения неоптимального состава и обеспечить требуемое качество, надёжность и безопасность продукции, в которой будет использоваться ПКМ.

Библиографические ссылки

1. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
2. Марков А.В., Виноградова Г.С. Оценка и выбор компоновочного решения при разработке оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов // Качество и жизнь. 2016. № 2. С. 5—10.
3. Крянев А.В., Семенов С.С. К вопросу о качестве и надежности экспертных оценок при определении технического уровня сложных систем // Надежность. 2013. № 4. С. 90—109.
4. Данилкович А.Г., Омельченко Н.В., Шахновский А.М. Оптимизация композиции для гидрофобизации эластичных материалов // Вестник Хмельницкого национального университета. 2012. № 1. С. 74—78.
5. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебник и практикум для вузов. М.: Изд-во «Юрайт», 2019. 495 с.
6. Берикашвили В.Ш. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы. М.: Изд-во «Юрайт», 2019. 164 с.
7. Ефремов Н.Ю., Орешина О.А. Анализ применимости методов математического моделирования и оптимизации для исследования свойств дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов // Перспективы науки. 2020. № 1 (124). С. 14—17.

Ссылка для цитирования

Марков А.В., Орешина О.А. Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 440—443.

УДК 621.373.5

Л.А. Васильева, М.И. Бойчук, С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННОГО СПАЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Рассмотрено применение капиллярной люминесцентной дефектоскопии для контроля металлостеклянного спаев пьезоэлектрических изделий. Проведён анализ стандартных методов испытаний таких изделий на герметичность и установлены рамки применимости каждого из этих методов на этапах жизненного цикла пьезоэлектрических изделий. Рассмотрены применительно к производству капиллярные методы контроля и показаны их преимущества. Для проверки герметичности пьезоэлектрических изделий в области металлостеклянного спаев выбран капиллярный люминесцентный метод контроля. Показаны этапы проведения такого контроля. Разработана методика контроля герметичности пьезоэлектрических изделий с применением капиллярного люминесцентного метода.

Ключевые слова: пьезоэлектрическое изделие; металлостеклянный спай; герметичность; контроль герметичности; испытания пьезоэлектрических изделий; капиллярный люминесцентный метод контроля; контроль качества; входной контроль.

The application of capillary luminescent defectoscopy for the inspection of a metal-to-glass junction of piezoelectric articles is considered. The analysis of the testing standard methods such articles for tightness is carried out and the framework of applicability of each of these methods at the stages of the life cycle of piezoelectric products is established. Capillary control methods in relation to production are considered and their advantages are shown. To check the tightness of piezoelectric products in the area of the metal-to-glass junction, a capillary luminescent control method is selected. The stages of such control are shown. The tightness control methodology of piezoelectric articles using the capillary luminescent method is developed.

Keywords: piezoelectric article; metal-glass junction; tightness; tightness control; tests of piezoelectric articles; capillary luminescent control method; quality control; input control.

Проверка герметичности пьезоэлектрических изделий проводится методом обнаружения утечки газа из их внутренних полостей при погружении в жидкость с повышенной температурой в соответствии с государственными стандартами и уточнениями, приведёнными в отраслевых стандартах на пьезоэлектрические изделия. В качестве жидкости используют деионизованную воду, нагретую до максимальной рабочей температуры, указанной в технических условиях на изделия. Кинематическая вязкость жидкости, характеризующая проникновение воды в корпус при наличии сквозных дефектов, должна быть не более $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при температуре испытания. Значения кинематической вязкости деионизованной воды в зависимости от температуры (от 30 до 100 °С) при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст. = 101 325 Па = 1,01325 бар) приведены в ГОСТе [1]. Рассмотренным методом можно обнаружить дефекты (течи) величиной не менее 1 мм. Более мелкие дефекты данным способом обнаружить невозможно. Такая проверка герметичности эффективна для изделий

с большим внутренним объёмом. Однако она теряет свою актуальность в связи с тенденцией к уменьшению массогабаритных характеристик электротехники. Среди производителей пьезоэлектрических изделий распространён ещё один метод проверки герметичности, используемый для вакуумных изделий в металлостеклянных корпусах. Он заключается в обнаружении утечки газа масс-спектрометром, применяется для пьезоэлектрических изделий, имеющих различные габаритные размеры и внутренние объёмы, обладает высокой надёжностью и позволяет обнаружить течи независимо от физических и химических свойств материала проверяемого изделия [2]. Проверка герметичности данным методом проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в установке изделий в камеру для опрессовки с введением в неё технического гелия. Следующий этап — выдержка изделий в камере с повышенным давлением, значение которого регламентируется техническими условиями на изделие. Третий этап — удаление остатков гелия с наружных поверхностей изделий с помощью обдува азотом. Заключительная ста-

дия — установка каждого изделия в камеру, соединённую с масс-спектрометром, и измерение массы гелия в объёме камеры при наличии его натекания из изделия в камеру.

Существенными преимуществами данного метода контроля герметичности являются высокая чувствительность, недоступная другим методам контроля, и отсутствие загрязнения изделий в процессе его проведения. Единственный недостаток — отсутствие возможности определения конкретного места течи. Установление точного места течи при серийном выпуске изделий позволит определить операцию технологического процесса, вследствие которой возникла течь, и принять соответствующие меры.

Герметичность пьезоэлектрических изделий — один из основных параметров, гарантирующих их стабильную работу в пределах срока службы, который в среднем составляет 15...25 лет. В негерметичные изделия со временем проникает воздух, и их параметры отклоняются от нормативных значений, установленных в технических условиях. Попадание негерметичных пьезоэлектрических изделий в аппаратуру потребителя приводит к серьёзным последствиям: замене ячеек и блоков или бракованию аппаратуры [3].

Одной из самых распространённых причин потери герметичности пьезоэлектрических изделий являются дефекты металlostеклянного спая. С наружной стороны корпуса их можно наблюдать в микроскоп при большом увеличении. Это обусловило актуальность выбора метода проверки герметичности в области металlostеклянного спая после операции герметизации корпусов, позволяющего определять связь дефектов спая с наружной стороны корпуса и герметичности изделия. Внешний вид металlostеклянного спая без дефектов показан на рис. 1.

Для определения связи внешних дефектов металlostеклянного спая с наружной стороны корпуса и герметичности изделия наряду с ранее представленными методами проверки герметичности были рассмотрены капиллярные методы. В отличие от стандартных методов проверки герметичности пьезоэлектрических изделий капиллярная дефектоскопия позволяет определить местоположение невидимых или слабо видимых дефектов на поверхности изделия, вызывающих течи. Пенетранты, используемые в капиллярной дефектоскопии, обладают достаточной проникающей способностью, позволяющей пене-



Рис. 1. Металlostеклянный спай без дефектов

транту проникать через металlostеклянный спай в подкорпусное пространство. Проникающая способность пенетрантов обусловлена рядом характеристик: плотностью пенетранта, оптической плотностью раствора, отношением значения оптической плотности на длине волны 375 нм к её значению на длине волны 455 нм. Описанная особенность капиллярной дефектоскопии позволяет определить связь дефектов спая на наружной стороне корпуса и герметичности пьезоэлектрических изделий.

Наиболее распространённые дефекты металlostеклянного спая — трещины, сколы, нарушения структуры стекла. Дефекты, выходящие на поверхность металlostеклянного спая с одной стороны, называются поверхностной несплошностью, а соединяющие противоположные стенки спая — сквозными. Внешний вид трещин, сколов и нарушений структуры металlostеклянных спаев показан на рис. 2.

Нарушения структуры стекла по внешнему диаметру стеклотаблетки фиксируются при поступлении корпусов на входной контроль перед сборкой пьезоэлектрических изделий, так как нарушения структуры стеклотаблетки возникают, как правило, в процессе изготовления корпусов. Видимые под микроскопом трещины и сколы стеклотаблетки при проведении входного контроля встречаются редко.

Возникновение трещин и сколов металlostеклянного спая в процессе производства обусловлено нарушением технологического процесса или развитием внутренних дефектов стеклотаблетки под воздействием внешних факторов.

Дефекты металlostеклянного спая могут проявиться:

на операции сборки пьезоэлектрических изделий «пайка держателей пьезоэлемента»;



Рис. 2. Металлостеклянные спаи с дефектами: трещинами (а); сколами по внутреннему диаметру стеклотаблетки (б); нарушением структуры стекла по внешнему диаметру стеклотаблетки (в)

при механической правке выводов изделий для замера параметров в нормальных климатических условиях и в интервале температур;

при механических испытаниях, например на теплостойкость при пайке, и испытаниях внешних выводов на прочность и др.

Данные дефекты приводят к нарушениям герметичности выпускаемых пьезоэлектрических изделий. Следует отметить, что поверхностные несплошности в процессе эксплуатации могут развиваться в сквозные. Это может произойти при проведении механических испытаний в составе плат, блоков или готовых приборов и аппаратуры. Для предотвращения отказов пьезоэлектрических изделий у конечного потребителя в течение всего срока эксплуатации необходимо обеспечить тщательный контроль герметичности в области металлостеклянного спая.

При исследовании был проведён анализ дефектоскопических материалов фирмы ООО «СПЕЦАВИА». Выбранный люминесцентный пенетрант ЛЖ-18НВ для капиллярной дефектоскопии обладает особо высокой чувствительностью и обеспечивает выявление на изделиях трещин глубиной от 0,01 до 0,03 мм и более, раскрытием от 0,0005 мм. Данный пенетрант входит в набор совместимых дефектоскопических материалов ЛЮМ-330В, состоящий из пенетранта ЛЖ-18НВ и очищающей жидкости ОЖ-7А [4]. Пенетрант ЛЖ-18НВ относится к материалам 1-го класса чувствительности [5]. Чувствительность капиллярной люминесцентной дефектоскопии обусловлена выбором люминофора — вещества, способного к эффективному преобразованию поглощаемой им энергии в световое излучение. Основные требования к люминофорам — яркое свечение в подходящем для человеческого глаза спектральном диапазоне и высокий выход люминесценции. Пенетранты, в состав

которых входит один люминофор, не обладают максимально возможной чувствительностью. Для повышения чувствительности пенетрантов в их состав включают два и более люминофоров. В состав пенетранта ЛЖ-18НВ входят два люминофора, взаимодействующих по принципу «каскадной люминесценции». Данный принцип состоит в межмолекулярном переносе энергии электронного возбуждения. Капиллярный люминесцентный контроль металлостеклянного спая проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в подготовке оснований корпусов пьезоэлектрических изделий к контролю. Подготовка включает очистку поверхности оснований корпусов химическим способом от различных загрязнений и последующую сушку. Очистка проводится обработкой водным раствором ацетона контролируемых оснований корпусов, а сушка осуществляется в потоке воздуха при повышенной температуре (90 °С) в течение 20 мин. Второй этап заключается в обработке металлостеклянного спая проверяемых изделий пенетрантом. Согласно эксплуатационной документации пенетрант ЛЖ-18НВ может наноситься несколькими способами: капиллярным, вакуумным, компрессионным, ультразвуковым, деформационным. При исследовании были выбраны два способа нанесения пенетранта. Первый способ, капиллярный, заключается в погружении контролируемых корпусов в пенетрант. Недостатком данного способа нанесения пенетранта является длительное время проникновения пенетранта в капилляры. Установлено, что среднее время нахождения корпусов в пенетранте, обеспечивающее заполнение им дефектной области, равно нескольким суткам. Второй способ нанесения, ультразвуковой, заключается в погружении контролируемых корпусов в пенетрант в ультразвуковой

ванне. При использовании данного способа время, за которое пенетрант проникает в дефекты металlostеклянного спа, значительно сократилось. При исследовании установлено увеличение ширины и глубины трещин стеклотаблетки при воздействии ультразвука. Если же металlostеклянный спай без дефектов, то ультразвук не провоцирует их возникновения. После заполнения полостей металlostеклянного спа пенетрантом необходимо удалить его избыток. В этом заключается третий этап проведения контроля. Выбранный пенетрант — водосмываемый. Он удаляется промывкой под струей воды, температура которой лежит в диапазоне 18...38 °С. Контролируемые изделия после промывки протираются бязью и сушатся в потоке воздуха. Следующий этап — очистка контролируемых изделий от остатков пенетранта жидкостью ОЖ-7А. На заключительном этапе контроля замеряются параметры изделий. Проникновение пенетранта внутрь корпуса изделия и попадание его на кристаллический элемент существенно влияют на параметры изделия: они могут не соответствовать установленным в технических условиях значениям. Увидеть сквозные дефекты в металlostеклянном спае можно после вскрытия изделий с помощью цифрового микроскопа Shuttlepix P-400R в ультрафиолетовом свете.

Примеры индикаторных рисунков, полученных при контроле металlostеклянного спа, приведены на рис. 3.

Следует отметить, что важными достоинствами капиллярного люминесцентного метода контроля являются обнаружение сквозных и поверхностных дефектов; определение их местоположения и протяжённости; возможность контроля изделий различных форм и размеров, изготовленных из различных материалов (металлов, сплавов, стекла и т. д.); высокая чувствительность; низкая стоимость покупаемых реагентов. Данный метод применим для контроля герметичности в области дефектов металlostеклянного спа и сварного шва корпусов пьезоэлектрических изделий. Применение капиллярного люминесцентного метода контроля герметичности металlostеклянных корпусов впервые реализовано АО «ЛИТ-ФОНОН» и рекомендуется для проверки пьезоэлектрических изделий после операции герметизации [6—9]. Также в рамках про-

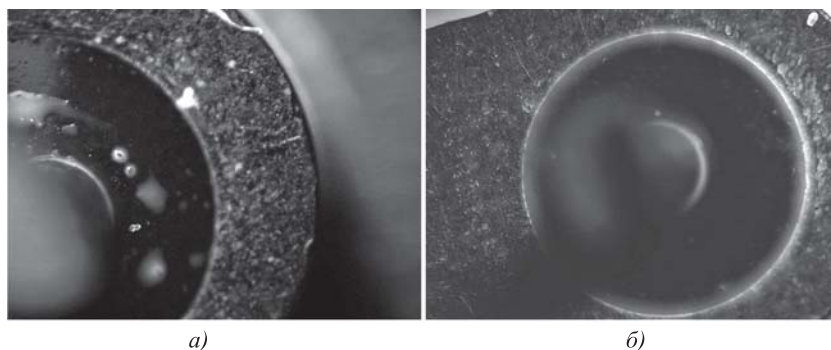


Рис. 3. Индикаторные рисунки дефектов металlostеклянного спа:
а — сквозные трещины стеклотаблетки; б — сколы по внешнему и внутреннему диаметрам стеклотаблетки

ведённых исследований разработана методика контроля герметичности пьезоэлектрических изделий с применением капиллярного люминесцентного метода.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ РВ 20.57.416—98. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний.
2. ГОСТ 20.57.406—81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний.
3. ГОСТ РВ 20.39.412—97. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Общие технические требования.
4. ТУ 2662-010-73057924-2004. Люминесцентный пенетрант ЛЖ-18НВ для капиллярной дефектоскопии.
5. ГОСТ 18442—80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования (с изменениями № 1, 2).
6. Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А. Температурно-частотные характеристики резонаторов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 8. С. 343—348.
7. Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. С. 150.
8. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.
9. Микаева С.А., Микаева А.С. Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.

Ссылка для цитирования

Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Контроль металlostеклянного спа пьезоэлектрических изделий // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 444—447.



УДК 539.122.2

С.Н. Григорьев-Фридман(Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского)

sergey-fridman@mail.ru

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ФИЗИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ФОТОНА

Выявлены новые физические свойства фотона как квазинейтральной элементарной частицы на атомно-молекулярном уровне взаимодействия излучения и поглощения фотонов при переходе электронов с внешних, удалённых орбит атомов вещества на более низкую орбиту вращения вокруг ядра атомов. Опытным путём обнаружены быстроменяющиеся во времени и пространстве собственные орбитальные отрицательный и положительный заряды фотона. Рассмотрено использование идеи российских учёных о наличии постоянно изменяющегося во времени и пространстве собственного орбитального заряда фотона при создании сверхмощного и дальнего боевого лазера.

Ключевые слова: фотон; электрон; позитрон; калибровочный бозон; фермион; синхрофазотрон; адронный коллайдер; лазер; спин; собственный орбитальный момент фотона; инерция орбитального вращения фотона; собственный орбитальный заряд фотона; модулированный лазерный луч; электромагнитная волна; лазерное излучение; длина волны; частота сигнала; квант; когерентность; масса фотона; скорость фотона; период; импульс фотона; энергия фотона; оператор Гамильтона; оператор возмущения; теорема Фарри; принцип дополнительности Бора; неопределённость Гейзенберга.

New physical properties of a photon as a quasi-neutral elementary particle at the atomic-molecular level of the radiation and photons absorption interaction during the electron transition from external, distant orbits of material atoms to a lower orbit of rotation around the nucleus of atoms are indicated. Experimentally, the intrinsic orbital negative and positive charge of the photon, rapidly varying in time and space is discovered. The using idea of the Russian scientists on the presence of an own orbital charge of photon constantly changing in time and space when creating a super-powerful and long-range combat laser is considered.

Keywords: photon; electron; positron; calibrating boson; fermion; synchrophasotron; Hadron Collider; laser; spin; photon own orbital moment; the inertia of the photon orbital rotation; photon own orbital charge; modulated laser beam; electromagnetic wave; laser radiation; wavelength; signal frequency; quantum; coherence; photon mass; photon speed; period; photon impulse; photon energy; Hamilton operator; perturbation operator; Farry's theorem; Bohr's complementarity principle; uncertainty of Heisenberg.

Введение. Основные проблемы квантовой механики и свойства элементарных частиц в отечественной [1–13] и иностранной [14–17] литературе освещены достаточно широко. Однако необходимо отметить, что все предыдущие исследования основывались лишь на классической квантовой теории излучения, поглощения, отражения и распространения фотонов и проводились в представлении, что фотон представляет собой лишь плоскую, поперечную электромагнитную волну в оптическом диапазоне, распространяющуюся в открытом пространстве со скоростью света. В настоящее время у отечественных и зарубежных учёных в этой области знания накопилась

обширная информация, полученная на основе лабораторно-экспериментальных исследований о характере и механизме поведения известных науке элементарных частиц в открытом пространстве и при взаимодействии с физическим веществом, с учётом распределения электромагнитного и гравитационного полей, в частности выявлены новые физические свойства фотона, на атомно-молекулярном уровне взаимодействия излучения и поглощения фотонов при переходе электронов с внешней, удалённой орбиты на более низкую орбиту их вращения вокруг ядра атомов.

Теоретические исследования российских учёных из г. Дубна и г. Саров и эксперименты

в адронном коллайдере Лос-Аламосской национальной лаборатории Министерства энергетики США (Los-Alamos National Laboratory USA) в интервале времени, доступном для обнаружения, фиксации и изучения самой квантовой природы элементарных частиц, показали существование быстроменяющихся во времени и пространстве собственных орбитальных отрицательного и положительного зарядов фотона, как у электрона и его античастицы — позитрона.

Если на ранних этапах исследования фотон изучался с помощью камеры Вильсона—Скобельцына, счётчика Гейгера—Мюллера, пузырьковой камеры Глейзера, счётчика Черенкова, в виде трековых траекторий движения при фиксации результатов эксперимента на фотоэмульсионной плёнке, когда время наблюдения $\tau = 10^{-12} \dots 10^{-15}$ с, то при взаимодействии двух встречных потоков фотонов в адронном коллайдере время наблюдения физических процессов уменьшается до $\tau = 10^{-18} \dots 10^{-20}$ с. В этом случае наличие быстроменяющегося собственного орбитального заряда у фотонов следует объяснять не только влиянием переменных электромагнитных полей, в частности сильного электрического поля, но и возрастающим влиянием общего гравитационного поля в период взаимодействия физического вещества с излучающим узкокогерентным пучком фотонов, его частичным поглощением и отражением при квантовом переходе электрона с одной орбиты на другую при его вращении вокруг ядра атома [4—9, 11—17].

Если в ускорителе элементарных частиц в г. Серпухов и в синхрофазотроне на экспериментальном полигоне Объединённого института ядерных исследований в г. Дубна использовался принцип взаимодействия потока элементарных частиц, таких как электрон, позитрон, протон, нейтрон, фотон, в ускоряющем электромагнитном поле с материалом физического вещества, то в адронном коллайдере Лос-Аламосской национальной лаборатории США использовался принцип взаимодействия двух встречных ускоряющихся потоков элементарных частиц, например пучков фотонов друг с другом, также в ускоряющем электромагнитном поле, но при этом мощность физического взаимодействия встречных ускоренных потоков частиц (фотонов) приблизительно в 2,5 раза больше, чем в российских серпуховской и дубненской конструкциях.

Теоретические основы классического взгляда на природу фотона. В конце 2019 г. учёные

Лос-Аламосской национальной лаборатории — Томас и Эдвард Ли Янг на одном из испытательных полигонов с синхрофазотроном и ускорителем элементарных частиц типа адронного коллайдера провели ряд экспериментов по обнаружению и фиксации собственного постоянно изменяющегося во времени и пространстве орбитального заряда у квазинейтральной элементарной частицы фотона.

Фотоны разгоняются во внутренней структуре инвертирующего кристалла до больших значений их кинетической энергии согласно формуле квантовой теории

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2, \quad (1)$$

где m_{ϕ} — релятивистская масса фотона; c — скорость света в свободном (воздушном) пространстве или вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Часто для удобства дальнейших вычислений применяют приведённую постоянную Планка

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \text{const}. \quad (2)$$

С другой стороны, электрон, переходя с верхней, удалённой орбиты на более низкую, излучает фотон. Таким образом происходит дискретное излучение энергии фотона, так называемыми порциями кванта, согласно формуле Планка

$$E_{\phi} = h\nu = \hbar\omega, \quad (3)$$

где $h = 6,626070040(81) \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $\hbar = 1,054571800(13) \cdot 10^{-34}$ Дж·с; ω — циклическая (угловая) частота входного сигнала, МГц; ν — частота входного сигнала, МГц.

Приравнивая выражения для энергии излучающего фотона (1) и (3), получаем

$$E_{\phi} = m_{\phi}c^2 = h\nu = \hbar\omega, \quad (4)$$

откуда точное релятивистское значение массы фотона при его движении в открытом воздушном пространстве или вакууме определяется выражением

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2}. \quad (5)$$

Из курса классической электродинамики известно, что фазовая скорость волны сигнала в обычной оптически более плотной, чем воздух или вакуум, среде определяется через скорость света:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0} \sqrt{\mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a} \sqrt{\mu_a}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0} \sqrt{\mu_0} \sqrt{\epsilon_a} \sqrt{\mu_a}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_a \mu_a}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}, \quad (6)$$

где v — фазовая скорость плоской монохроматической электромагнитной волны в оптически плотной среде (газах, жидкостях, твёрдых телах), $v = f(\epsilon_a, \mu_a) \Big|_{\substack{\epsilon_a \geq \epsilon_0 \approx 1; \\ \mu_a \geq \mu_0 \approx 1}} \leq c$; ϵ_a, μ_a — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости оптически плотной среды соответственно, $\epsilon_a \geq \epsilon_0 \approx 1$ и $\mu_a \geq \mu_0 \approx 1$; ϵ_0, μ_0 — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного воздушного пространства (вакуума) соответственно, $\epsilon_0 \approx 1$ и $\mu_0 \approx 1$.

Отсюда получаем скорость плоской монохроматической электромагнитной волны в оптически плотной среде

$$c = v \sqrt{\epsilon_a \mu_a}. \quad (7)$$

Окончательно точное релятивистское значение массы фотона при его движении в оптически плотной среде определяется выражением

$$m_\phi = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{v^2 \epsilon_a \mu_a}. \quad (8)$$

Следует отметить, что массы и скорости электрона и позитрона — величины постоянные, не зависящие от частоты сигнала на входе андронного коллайдера, тогда как масса фотона полностью зависит от частоты входного сигнала, т. е. массы фотона для каждой частоты будут различными.

Необходимо помнить, что действительная (реальная) масса фотона в состоянии покоя $m_{\phi 0} = 0$, т. е. существует только так называемая релятивистская масса фотона, отличная от нуля. Таким же образом обстоит дело и со скоростью фотона, которая в состоянии покоя отсутствует: $v_{\phi 0} = 0$, и существует лишь тогда, когда фотон движется со скоростью света как поперечная электромагнитная волна в определённой среде.

Также следует учесть, что собственный спин фотона $S_\phi = 1\hbar$. Спиральность фотона $H_\phi = \pm 1$. Число рабочих спиновых состояний фотона $Q_{S_\phi} = 2$. Зарядовая чётность фотона отрицательная: $P = -1$. Существует ещё и так называемое

промежуточное, нерабочее спиновое состояние фотона, при котором промежуточный собственный спин фотона $S_{\text{пр.}\phi} = \pm 0\hbar = 0$ и промежуточный заряд фотона $Q_{\text{пр.}\phi} = \pm 0 = 0$.

Согласно рис. 1 общий суммарный заряд фотона всегда равен нулю за минимальный период ($T_{\text{min}} = 2\pi$) распространения электромагнитной волны в среде:

$$\sum_{\phi}^{T_{\text{min}}=2\pi} Q_{2\pi} = Q_{1^+} + Q_{2^+} + Q_{3^-} + Q_{4^-} = 1^+ + 0^+ + 1^- + 0^- = +1e + 0 - 1e - 0 = 0,$$

где $+1e$ — заряд позитрона (протона); $-1e$ — заряд электрона; $Q_{1^+}, Q_{2^+}, Q_{3^-}, Q_{4^-}$ — заряды фотона за первую, вторую, третью и четвёртую четверти периода волны T соответственно.

В первой четверти своего периода: $0 \leq T_1 \leq \pi/2$ заряд квазинейтральной частицы увеличивается по экспоненциальному закону выпуклой огибающей функции: $Q_{1^+} > 0^+ = +0e$. Огибающая функция описывается векторным потенциалом фотона

$$\vec{A}_{n=1,\dots,N}(\vec{r}, t) = A_0(\vec{r}) \mathbf{e}^{-i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} \sin\left(\frac{\pi n}{l} \vec{r}\right), \quad (9)$$

где $\vec{r} = r(x, y, z)$ — радиус-вектор; t — время распространения фотона в среде; \mathbf{e} — основание натуральных логарифмов; l — длина пути движения фотона.

При этом заряд фотона имеет максимальное положительное значение, равное заряду

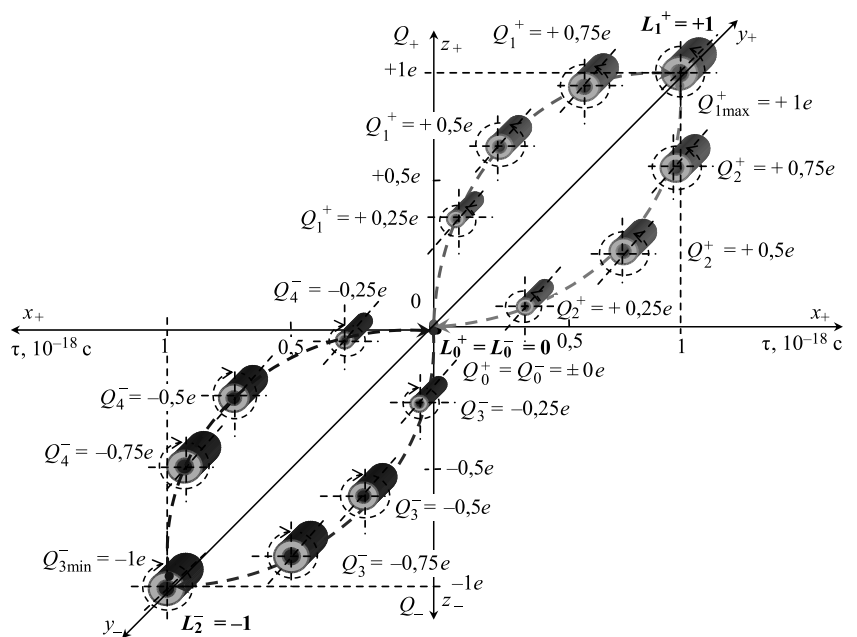


Рис. 1. Спино-орбитальная модель существования фотона и изменение его собственного орбитального заряда за время наблюдения $\tau = 2 \cdot 10^{-18}$ с

позитрона (античастицы электрона со спином $S_{p^+} = \frac{1}{2} \hbar$): $Q_{1^+} = 1^+ = +1e$, в своей точке при $T_{1\max} = \pi/2$. Необходимо отметить, что в этой точке орбитальный момент вращения фотона вокруг своей оси $L_1^+ = +1$.

В следующей, второй, четверти периода: $\pi/2 \leq T_2 \leq \pi$ значение заряда фотона уменьшается по вогнутой экспоненте с максимального значения $Q_{1^+} = 1^+ = +1e$ до нуля: $Q_{2^+} = 0^+ = +0e$, т. е. поперечная монохроматическая электромагнитная волна проходит через своё первое нулевое значение по амплитуде и по заряду, когда фотон практически теряет скорость, останавливается, имеет практически нулевую массу покоя, при этом у фотона в этот момент времени также отсутствуют энергия и импульс движения. Согласно рис. 1 в этой точке орбитальный момент вращения фотона относительно своей оси $L_0^+ = L_0^- = 0$. «Проскакивая» через нулевую точку, заряд фотона начинает снова увеличиваться по модулю, также по экспоненциальному закону (выпуклый участок экспоненты) от нуля: $Q_{3^-} = 0^- = -0e$ до $Q_{3^-} = 1^- = -1e$, в третьей четверти периода: $\pi \leq T_3 \leq 3\pi/2$. При этом заряд фотона имеет максимальное отрицательное значение, равное заряду электрона (со спином $S_{e^-} = \frac{1}{2} \hbar$): $Q_{3^-} = 1^- = -1e$, в течение последующей, третьей, четверти периода электромагнитной волны при $T_{3\min} = 3\pi/2$.

Стоит отметить, что в этой точке орбитальный момент вращения фотона вокруг своей оси $L_{2^-} = -1$. После этого, в течение четвёртой четверти периода электромагнитной волны: $3\pi/2 \leq T_4 \leq 2\pi$, заряд фотона по модулю уменьшается по вогнутой экспоненте со своего максимального отрицательного значения $Q_{3^-} = 1^- = -1e$ до нуля: $Q_{4^-} = 0^- = -0e$, т. е. амплитуда поперечной монохроматической электромагнитной волны проходит через второе нулевое значение, когда фотон снова теряет свою скорость, останавливается, имеет практически нулевую массу покоя, при этом у фотона в этот момент времени отсутствуют энергия и импульс движения.

Исходя из теоремы Фарри и закона сохранения зарядовой чётности и её мультипликативности в электромагнитных явлениях невозможно превращение чётного числа фотонов в нечётное и наоборот, так как фотон относится к так называемым калибровочным бозонам и участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействии с веществом

в природе. Причём часть своего активного времени фотон находится в состоянии виртуальной частицы — векторного мезона или же виртуальной пары — адрон—антиадрон. (Все атомы в природе состоят из протонов и нейтронов, которые называются адронами.)

Необходимо особо подчеркнуть, что фазовый переход при изменении заряда фотона, например, из состояния $Q_{1\max}^+ = +1e$, соответствующего заряду позитрона, в состояние $Q_{3\min}^- = -1e$, соответствующее элементарному заряду электрона, в принципе невозможен из-за нарушения принятого в квантовой механике принципа дополнительности Бора [5—11]. Возможны переходы из состояния $Q_{1\max}^+ = +1e$ в состояние $Q_0^+ = +0e$ и обратно: $(Q_{1\max}^+ = +1e) \leftrightarrow (Q_0^+ = +0e)$, а также из состояния $Q_{3\min}^- = -1e$ в состояние $Q_0^- = -0e$ и обратно: $(Q_{3\min}^- = -1e) \leftrightarrow (Q_0^- = -0e)$. Дело в том, что два орбитальных момента вращения фотона вокруг своей оси взаимно противоположны в силу того, что в квантовой механике за положительное направление вращения фотона относительно своей оси принято направление против часовой стрелки, и его собственный орбитальный момент $L_1^+ = J_1\omega = +1$. Если же направление собственного орбитального момента вращения фотона относительно своей оси будет по часовой стрелке, то будет считаться отрицательным и, следовательно, в этом случае $L_2^- = J_2\omega = -1$. Причём $J_1 = -J_2$, т. е. моменты инерции вращения самого фотона относительно орбитальной оси вращения J_1 и J_2 при различных переходах противоположно направлены. За весь минимальный период электромагнитной волны $T_{\min} = 2\pi$ заряд фотона изменяется от $+1e$ до $-1e$ и обратно, проходя при этом через характерную нулевую точку $\pm 0e$, где электрический заряд фотона также равен нулю.

Среднее общее время изменения собственного заряда фотона $\tau \approx 2 \cdot 10^{-18}$ с. Время существования положительного или отрицательного собственного заряда фотона составляет $0,2 \cdot 10^{-18}$ с, когда положительный заряд $Q^+ = +0,8e \dots +1e$ и отрицательный $Q^- = -0,8e \dots -1e$.

Фотон представляет собой своеобразный энергетический электромагнитный диполь, постоянно изменяющийся во времени и пространстве, и тем самым подчиняется квантовому принципу неопределённости Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (10)$$

Изменяя величину среднего квадратиче-ского отклонения координаты Δx и среднего квадратического отклонения импульса Δp и при этом обладая скоростью света, фотон до-пускает неограниченную точность измерения своих координат во времени и пространстве, а значит, и изменяющегося его собственного орбитального заряда.

При отражении от зеркальной поверхности или прохождении сред с градиентом плотно-сти, т. е. при явлениях абберации, опытным путём обнаруживается изменение направле-ния движения фотона [5]. Во всех приведён-ных случаях фотоны не поглощаются веще-ством и явно не входят с носителями вещества в контактное взаимодействие, т. е. в формате элементарных частиц среды. Однако при этом происходит смена направления и поляризации фотона [7]. Такое поведение фотона, как фер-мион-частицы, возможно только под действи-ем постоянных электрических полей, форми-руемых электронами и протонами среды. Ана-лиз результатов множества экспериментов показывает, что действенным фактором при квантовых взаимодействиях частиц является не только величина напряжённости электри-ческого поля \vec{E} , но и изменение индукции этого поля $\text{grad } \vec{D} = \nabla \vec{D}$ по характерным коор-динатам x, y, z и времени t . Следовательно, фо-тон является отличным квантовым детектором градиента электрического поля [9]. Это ут-верждение основано на уравнениях Максвелла

$$\begin{aligned} \text{grad } \vec{D} &= \nabla \vec{D} = \nabla(\varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}) = \varepsilon_0 \varepsilon \nabla \vec{E} = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial z} \vec{k} \right) = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial z} \vec{e}_z \right) = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial z} \right) = \rho_{\text{пов}}^E, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{grad } \vec{B} &= \nabla \vec{B} = \nabla(\mu_0 \mu \vec{H}) = \varepsilon_0 \varepsilon \nabla \vec{H} = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial z} \vec{k} \right) = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial z} \vec{e}_z \right) = \\ &= \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial z} \right) = \rho_{\text{пов}}^H = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H}(x, y, z, t) &= \frac{I_R^E}{S_R} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \\ &= \frac{I_R^E}{S_R} + \vec{i} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_y & H_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \\ H_x & H_y \end{vmatrix} = \\ &= \frac{I_R^E}{S_R} + \vec{i} \left| \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right| - \vec{j} \left| \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right| + \\ &+ \vec{k} \left| \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right| = \frac{I_R^E}{S_R} + \vec{i} \left| \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right| + \\ &+ \vec{j} \left| \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right| + \vec{k} \left| \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right| = \\ &= \frac{I_R^E}{S_R} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \vec{i} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \vec{j} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \vec{k} = \\ &= \frac{I_R^E}{S_R} + \varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t} + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t} \right) = \\ &= \frac{I_R^E}{S_R} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t} = j_S^E + \frac{\partial \vec{D}(x, y, z, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}(x, y, z, t) &= \frac{I_R^H}{S_R} + \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \\ &= \frac{I_R^H}{S_R} + \left(\vec{i} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_y & E_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \\ E_x & E_y \end{vmatrix} \right) = \\ &= \frac{I_R^H}{S_R} + \vec{i} \left| \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right| - \vec{j} \left| \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right| + \\ &+ \vec{k} \left| \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right| = \frac{I_R^H}{S_R} + \vec{i} \left| \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right| + \\ &+ \vec{j} \left| \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right| + \vec{k} \left| \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right| = \\ &= \frac{I_R^H}{S_R} - \mu_0 \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \vec{i} - \mu_0 \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \vec{j} - \mu_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \vec{k} = \\ &= \frac{I_R^H}{S_R} - \mu_0 \mu \left(\frac{\partial \vec{H}_x}{\partial t} + \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial t} + \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial t} \right) = \\ &= \frac{I_R^H}{S_R} - \mu_0 \mu \frac{\partial \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial t} = j_S^H - \frac{\partial \vec{B}(x, y, z, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (14)$$

где \vec{D}, \vec{B} — векторы электрической и магнитной индукций среды, в которой движется фотон, соответственно; \vec{E}, \vec{H} — векторы напряжён-

ности электрического и магнитного полей среды, в которой движется фотон, соответственно; $|\vec{l}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = |\vec{e}_x| = |\vec{e}_y| = |\vec{e}_z| = 1$ — единичные векторы-орты вдоль координатных осей в декартовой системе координат среды; $\rho_{\text{пов}}^E, \rho_{\text{пов}}^H$ — плотности поверхностных электрических и магнитных зарядов среды, в которой движется фотон, соответственно; j_S^E, j_S^H — плотности электрических и магнитных токов в толще среды, в которой движется фотон, соответственно.

Нестационарная теория возмущений. Пусть H_0 — так называемый оператор спокойствия, представляющий из себя не зависящий от времени гамильтониан квантовой системы в отсутствие внешних электрических и магнитных полей. Для этого гамильтониана уравнение Шрёдингера допускает точное решение. Тогда полный гамильтониан H этой системы в присутствии нестационарного внешнего поля [8, 11, 12—17] имеет классический вид

$$H = H_0 + V(\vec{r}, t), \quad (15)$$

где $V(\vec{r}, t)$ — оператор возмущения, описывающий взаимодействие внешнего электромагнитного поля с квантовой системой.

Теория возмущений используется при выполнении условия (16):

$$V(\vec{r}, t) \ll H_0. \quad (16)$$

Пусть квантовая система находится в поле падающей монохроматической электромагнитной волны, характеристики которой периодически изменяются со временем с частотой ω . Тогда оператор возмущения $V(\vec{r}, t)$ также будет периодически изменяться со временем по экспоненте с той же частотой ω , следовательно, он может быть записан в виде

$$V(\vec{r}, t) = 2\gamma(\vec{r}) \cos \omega t = \gamma(\vec{r}) e^{i\omega t} + \gamma(\vec{r}) e^{-i\omega t}, \quad (17)$$

где $\gamma(\vec{r}) = \gamma(x, y, z)$ — функция начального амплитудного значения в операторе возмущения $V(\vec{r}, t)$.

Введём обозначение $V^\pm(\vec{r}, t) = \gamma(\vec{r}) e^{\pm i\omega t}$, тогда оператор возмущения $V(\vec{r}, t)$ принимает вид

$$V(\vec{r}, t) = V^+(\vec{r}, t) + V^-(\vec{r}, t). \quad (18)$$

В разложении в функциональный ряд зависящая от времени возмущений вероятность w перехода квантовой системы из состояния, описываемого волновой функцией ψ_i , в состояние, описываемое волновой функцией ψ_f

(ψ_i и ψ_f — собственные волновые функции оператора H_0), под действием возмущения $\gamma(\vec{r}) e^{\pm i\omega t}$ задаётся выражением

$$w = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \int \Psi_f^* \gamma(\vec{r}) \Psi_i d\vec{r} \right|^2 \rho_f(E_f) = \frac{2\pi}{\hbar} |f| |\gamma(\vec{r})|^2 \rho_f(E_f), \quad (19)$$

причём переходы происходят в состояния, обладающие энергией $E_f = E_i + \hbar\omega$ и плотностью $\rho_f(E_f)$ (E_i, E_f — собственные значения оператора H_0 , отвечающие собственным волновым функциям Ψ_i и Ψ_f).

Возмущение $V^+(\vec{r}, t)$ приводит к тому, что квантовая система теряет энергию $\hbar\omega$ путём её вынужденного испускания $E_f = E_i - \hbar\omega$. Под действием возмущения $V^-(\vec{r}, t)$ система приобретает энергию $\hbar\omega$, и $E_f = E_i + \hbar\omega$. Будем рассматривать лишь последний случай, соответствующий поглощению энергии электромагнитного поля, оставляя в операторе возмущения $V(\vec{r}, t)$ лишь второе слагаемое $V^-(\vec{r}, t)$, которое зависит от времени как $e^{-i\omega t}$.

Квантовая система в поле плоской электромагнитной волны. Рассмотрим случай, когда на квантовую систему падает плоская монохроматическая электромагнитная волна. Тогда полный гамильтониан H системы частиц и электромагнитного поля [4, 6, 11—17] имеет вид

$$H = H_0 + H_{el} + V(\vec{r}, t), \quad (20)$$

где H_0 — гамильтониан системы в отсутствие внешних электрических и магнитных полей; H_{el} — гамильтониан энергии электромагнитного поля; $V(\vec{r}, t)$ — гамильтониан взаимодействия системы с электромагнитным полем, представляющий собой оператор возмущения.

В дальнейшем под системой будем понимать совокупность \bar{A} нерелятивистских частиц. Тогда имеем выражение

$$H_0 = \sum_{a=1}^A \frac{p_a^2}{2m_a} + \sum_{a < b} W_{ab}, \quad (21)$$

где p_a, m_a — оператор импульса и масса частиц системы соответственно; W_{ab} — энергия взаимодействия нерелятивистских частиц a и b (для которых их скорости $\{v_a, v_b\} < c$).

Классическое выражение для гамильтониана энергии электромагнитного поля [11, 12] принимает вид

$$H_{el} = \frac{1}{8\pi} \int (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) dx dy dz = \frac{1}{8\pi} \int (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) d\vec{r}. \quad (22)$$

Если поле квантовано и представляет собой совокупность энергии $\hbar\omega$ n фотонов, то энергия такого электромагнитного поля определяется выражением

$$H_{n=1,\dots,N}^{el} = n\hbar\omega, \quad (23)$$

где N — бесконечно большое число.

Выражение для оператора $V(\vec{r}, t)$ в случае бесспиновых частиц имеет вид

$$V(\vec{r}, t) = -\frac{1}{c} \sum_{a=1}^A \frac{e_a}{m_a} \vec{A}_a(\vec{r}, t) p_a, \quad (24)$$

где e_a — электрические заряды a -частиц системы; m_a — масса a -частиц системы; $\vec{A}_a(\vec{r}, t)$ — векторный потенциал электромагнитной волны в той точке, где находится частица a .

Конкретизируем это выражение для случая, когда система поглощает падающую на неё плоскую монохроматическую электромагнитную волну. Векторный потенциал \vec{A} такой волны [11, 12] можно записать в виде

$$\begin{aligned} \vec{A}(\vec{r}, t) &= 2A_0\epsilon \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t) = \\ &= A_0\epsilon e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} + A_0\epsilon e^{-i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \end{aligned} \quad (25)$$

где \vec{k} — волновой вектор, направление которого определяет направление распространения волны ($\vec{k} = \frac{\omega}{c} \vec{n}_k$, $|\vec{n}_k| = 1$ — единичный вектор в направлении \vec{k}).

Векторный потенциал $\vec{A}(\vec{r}, t)$ должен удовлетворять условию

$$\text{div} \vec{A}(\vec{r}, t) = 0. \quad (26)$$

Для плоской поперечной электромагнитной волны, поляризованной перпендикулярно направлению распространения, условие (26) равносильно требованию

$$(\vec{k}\vec{\epsilon}) = 0, \quad (27)$$

где $|\vec{\epsilon}| = 1$ — единичный вектор поляризации излучения.

Подставляя в формулу (24) для $V(\vec{r}, t)$ лишь первый член $A_0\epsilon e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$ из выражения (25) для векторного потенциала плоской волны, который имеет отрицательную частоту $e^{-i\omega t}$ и, следовательно, отвечает за поглощение излучения, получаем

$$V(\vec{r}, t) = \gamma(\vec{r}) e^{-i\omega t} = -A_0\epsilon e^{-i\omega t} \frac{1}{c} \sum_{a=1}^A \frac{e_a}{m_a} e^{i\vec{k}\vec{r}_a} p_a, \quad (28)$$

где r_a — радиус-вектор частицы a .

Амплитуда векторного потенциала электромагнитной волны (25) определяется из уравнения

$$\vec{A}_0 = A_0\vec{\epsilon}. \quad (29)$$

Для оператора возмущения $V(\vec{r})$ имеем в итоге выражение

$$V(\vec{r}) = -\frac{1}{c} A_0 \sum_{a=1}^A \frac{e_a}{m_a} e^{i\vec{k}\vec{r}_a} p_a. \quad (30)$$

Классическое представление излучения фотонов. Из курса квантовой механики известно, что электромагнитная волна, состоящая из n фотонов, не может иметь любую интенсивность [4, 6, 11—15, 17]. Поэтому необходимо амплитуду векторного потенциала A_0 нормировать так, чтобы она соответствовала n фотонам в единице объёма. В этом случае усреднённая по времени плотность энергии электромагнитной волны будет равна энергии n фотонов согласно выражению

$$\frac{1}{8\pi} \langle E^2 + H^2 \rangle = n\hbar\omega. \quad (31)$$

Используя выражения

$$\langle \vec{E}^2 \rangle = \langle \vec{H}^2 \rangle, \quad (32)$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (33)$$

$$\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}, \quad (34)$$

получаем формулу для усреднённой по времени плотности энергии электромагнитной волны для n фотонов

$$\frac{1}{8\pi} \langle E^2 + H^2 \rangle = \frac{A_0^2 \omega^2}{2\pi c^2} \quad (35)$$

Приравнявая выражения (31) и (35), получаем равенство

$$\frac{A_0^2 \omega^2}{2\pi c^2} = n\hbar\omega, \quad (36)$$

откуда получаем формулу для нормированной амплитуды векторного потенциала A_0 для n фотонов в единице объёма

$$A_0 = c \sqrt{\frac{2\pi\hbar n}{\omega}}. \quad (37)$$

Так как нам важен только процесс поглощения излучения фотонов, то в дальнейшем для

плоской электромагнитной волны будем использовать выражение

$$\vec{A}_{n=1,\dots,N}(\vec{r}, t) = \sqrt{\frac{2\pi\hbar n}{\omega}} c \varepsilon \mathbf{e}^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}. \quad (38)$$

Нормируем плоскую волну так, чтобы она давала один фотон в единице объёма, тогда в конечном итоге получим выражение

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \sqrt{\frac{2\pi\hbar}{\omega}} c \varepsilon \mathbf{e}^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}. \quad (39)$$

Классификация фотонов и мультипольные волны. Состояния атома и ядра квантовых систем характеризуются определёнными значениями момента количества движения J и чётности P . Поэтому в любом процессе поглощения и излучения, в котором такие квантовые системы переходят из одного состояния в другое, должны учитываться правила отбора по моменту и чётности. Если атом или ядро переходит из одного состояния в другое в результате поглощения электромагнитного излучения, то законы сохранения момента количества движения и чётности требуют, чтобы поглощённое излучение также имело определённые значения J и P . Поэтому участвовать в атомных и ядерных процессах может лишь такое электромагнитное излучение, волновая функция которого — собственная функция операторов момента и чётности [4, 6, 11—15, 17].

Векторный потенциал $\vec{A}(\vec{r}, t)$ плоской электромагнитной волны, не имеющей определённых момента количества движения и чётности, разлагается в ряд по состояниям с определёнными значениями J и P по мультипольным волнам или мультиполям [4, 6, 11—15, 17]. Отдельные члены такого разложения будут соответствовать электромагнитным волнам (фотонам) с определёнными значениями момента и чётности, которые могут быть поглощены атомами и ядрами. Задача состоит в том, чтобы перейти от поля фотонов с определённым значением импульса фотона $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ к полю фотонов с определёнными значениями момента количества движения J и чётности P .

Полный момент количества движения фотона \vec{J} принимает целочисленные значения начиная с единицы: $J = 1, 2, 3, \dots$. Невозможность для фотона $J = 0$ следует из того, что электромагнитная волна поперечна, и поэтому не может быть описана сферически симметричной волновой функцией.

К фотону неприменимо обычное определение спина как момента количества движе-

ния в системе покоя, так как такой системы для фотона не существует. Поскольку фотон — квант векторного поля, а любое векторное поле пригодно для описания частицы со спином 1, при обретении свойства векторного поля с учётом вращения системы координат, то фотону удобно приписать спин $S = 1$. Из этого следует, что полный момент фотона \vec{J} можно формально рассматривать как векторную сумму спинового \vec{S} и орбитального \vec{L} моментов: $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$, причём орбитальный момент L в данном случае не что иное, как ранг сферических функций Y_{Lm} , входящих в состав волновой функции фотона [4—12].

Фотоны с определённым значением J называются $2J$ -польными (дипольными, если $J = 1$; квадрупольными, если $J = 2$; октупольными, если $J = 3$, и т. д.). Для данного J квантовое число орбитального момента L может принимать три значения: $L = J + 1, J, J - 1$, так как спин фотона $S = 1$.

Чётность фотона P определяется правилом

$$P = (-1)^{L+1}. \quad (40)$$

Поэтому фотоны с одинаковым J могут иметь различные значения орбитального момента, а следовательно, и чётности. Фотоны, для которых орбитальный момент совпадает с полным: $L = J$, имеют чётность $(-1)^{J+1}$ и называются магнитными M_J -фотонами. Фотоны, для которых $L = J + 1$, имеют чётность $(-1)^J$ и называются электрическими E_J -фотонами. Таким образом, фотоны электрического типа в отличие от фотонов магнитного типа не имеют определённого значения орбитального момента. Их волновая функция является линейной комбинацией состояний с $L = J + 1$ [4—17].

Для описания электрического (E_J) и магнитного (M_J) излучений используются электрические и магнитные потенциалы \vec{A}_{JM}^E и \vec{A}_{JM}^M , которые можно рассматривать как собственные функции E_J - и M_J -излучений, имеющих проекцию полного момента, равную M . Разложение плоской электромагнитной волны по мультиполям есть разложение по характеристическим функциям A_{JM}^E и A_{JM}^M [4—17].

Наиболее простой вид это разложение имеет тогда, когда плоская электромагнитная волна поляризована по кругу и её волновой вектор \vec{k} направлен вдоль оси Oz [4—9, 11—17]. В этом частном случае разложение по мультиполям имеет вид

$$A(\vec{r}, t) = A_0 \vec{e}_p e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} = \\ = A_0 \vec{e}_p e^{i\omega t} \sum_{J=1}^{\infty} i^J \sqrt{2\pi(2J+1)} (iA_{J_p}^E + pA_{J_p}^M), \quad (41)$$

где \vec{e}_p — базисные векторы комплексной циркулярной системы координат, причём левой круговой поляризации отвечает $p = +1$, а правой — $p = -1$.

В соответствии с этим проекция полного момента фотона M принимает значения ± 1 .

Для наиболее простого случая, когда начальное состояние квантовой системы имеет нулевой спин ($S = 0$) и либо положительную, либо отрицательную чётности. Возможные конечные состояния системы, возникающие при поглощении дипольных и квадрупольных фотонов электрического и магнитного типа, показаны на рис. 2.

Если волновой вектор \vec{k} имеет произвольное направление, то разложение по мультиполям [4—9, 11—17] представляет собой более сложное выражение

$$A(\vec{r}, t) = A_0 \vec{e}_p e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} = A_0 e^{i\omega t} \sum_{J=1}^{\infty} \sum_{M=-J}^J i^J \times \\ \times \sqrt{2\pi(2J+1)} D_{M_p}^J(\hat{\phi}, \hat{\theta}, 0) (iA_{J_p}^E + pA_{J_p}^M), \quad (42)$$

где $p = \pm 1$ — круговая поляризация плоской электромагнитной волны; $D_{M_p}^J$ — матрица вращений, зависящая от углов $\hat{\theta}$ и $\hat{\phi}$, которые определяют направление волнового вектора \vec{k} в полярной системе координат.

В этом случае проекция полного момента фотона M принимает все возможные значения: $M = +J, + (J - 1), \dots$

Практическое применение новых квантовых свойств фотона. В последнее время началось серийное производство квантовых генераторов и источников лазерного излучения, а также микропроцессоров на квантовых началах с использованием факта наличия и изменения собственного орбитального заряда фотона для мощных и сверхбыстродействующих современных компьютеров. Использование идеи российских учёных о наличии постоянно изменяющегося во времени и пространстве собственного орбитального заряда фотона стало фундаментальной основой при создании сверхмощного (до 1 МВт) и дальнодействующего (до 220 км) боевого лазера. Скорость передачи узкокогерентным пучком фотонов модулированной бит-информации в 10^{10} раз больше, чем при передаче аналогичной цифровой информации с использованием электро-

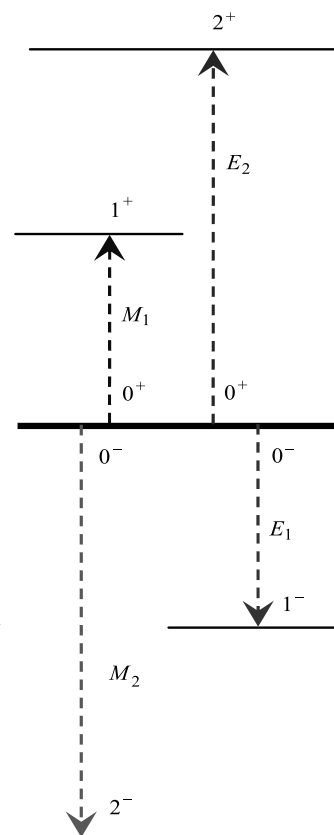


Рис. 2. Спино-орбитальная модель изменения конечного состояния электрических и магнитных переходов в квантовой системе фотона за время наблюдения $\tau \approx 10^{-18}$ с, при нулевом спине ($S = 0$) и уровне отсчёта, определяемом либо положительной, либо отрицательной чётностями

нов в качестве основных носителей заряда и переносчиков информации от источника (передатчика) к потребителям (приёмнику).

В этой связи необходимо отметить, что боевой лазер, установленный на эсминцы Porter, Ross и Donald Cook ВМС США, имеет мощность до 100 кВт при эффективной дальности поражения на расстоянии до 30 км. Причём если на американских военных кораблях или автомобилях лазерная установка работает на полную мощность, то при этом корабль или боевой автомобиль останавливается. Он не имеет возможности идти своим ходом, так как не хватает мощности для необходимой мобильности при сеансах поражающего лазерного облучения противника, и становится прекрасной неподвижной целью. Российский же боевой лазер состоит из одного рабочего и одного резервного боевых реакторов и одного реактора для необходимой начально-ускоряющей подкачки. Первые два реактора работают на быстрых нейтронах с использованием собственного орбитального заряда узконаправленного когерентного пучка фотонов, летящих на обнаруженную цель, а реактор подкачки функционирует на медленных (тепловых) нейтронах.

Российский боевой лазер работает автономно, независимо от функционирования энергетической установки военного корабля

или автомобиля, что является большим достижением российской военной инженерной мысли. Российская лазерная установка имеет три автономных, независимых уровня охлаждения квантового автогенератора непрерывного и импульсного типа генерации фотонного пучка боевого лазера.

Выводы:

1. Выявлены новые физические свойства фотона на атомно-молекулярном уровне взаимодействия излучения и поглощения фотонов при переходе электронов с внешних, удалённых орбит атомов вещества на более низкую орбиту вращения вокруг ядра атомов.

2. Опытным путём обнаружены быстроизменяющиеся во времени и пространстве собственные орбитальный отрицательный и положительный заряды фотона.

3. Фотон — квазинейтральная элементарная частица, обладающая быстроизменяющимся во времени и пространстве зарядом: от $-1e$ — отрицательный заряд, численно равный заряду элементарного электрона, до $+1e$ — положительный заряд, численно равный заряду элементарного позитрона как античастицы электрона.

4. Время существования положительного или отрицательного собственного заряда фотона $\tau \approx 0,2 \cdot 10^{-18}$ с, когда положительный заряд $Q^+ = +0,8e \dots +1e$ и отрицательный заряд $Q^- = -0,8e \dots -1e$.

5. Массы фотона для каждой частоты в рассматриваемом диапазоне отличаются друг от друга.

6. Интенсивность, инверсность, мощность и сила лазерного излучения сильно зависят от диапазона рабочих частот входного сигнала.

7. Существует только так называемая релятивистская масса фотона, отличная от нуля, так как его действительная (реальная) масса в состоянии покоя равна нулю: $m_{\phi 0} = 0$.

8. Скорость фотона в состоянии покоя отсутствует: $v_{\phi 0} = 0$, так как фотон движется со скоростью света, как поперечная электромагнитная волна, в определённой среде.

9. Амплитуда поперечной монохроматической электромагнитной волны, проходя через своё нулевое значение, характеризуется тем, что в этой точке заряд фотона начинает уменьшаться по экспоненте со своего максимального значения $Q_{1+} = 1^+ = +1e$ до нуля: $Q_{2+} = 0^+ = +0e$, когда сам фотон практически теряет свою скорость, имеет практически нулевую массу покоя, при этом в данный момент времени у фотона также отсутствуют энергия и импульс движения.

10. В течение всего периода электромагнитной волны $T = 2\pi$ фотон энергетически нейтрален и его полный заряд $Q_{\phi}^{2\pi} = 0$.

11. Рассмотрена нестационарная теория возмущения квантовой системы в присутствии нестационарного внешнего поля. Возмущение $V^+(\vec{r}, t)$ приводит к тому, что квантовая система теряет энергию $\hbar\omega$ путём вынужденного испускания фотона: $E_f = E_i - \hbar\omega$. Под действием возмущения $V^-(\vec{r}, t)$ система приобретает энергию $\hbar\omega$ и $E_f = E_i + \hbar\omega$.

12. Электромагнитное поле излучения фотона представлено в классической форме плоской поперечной монохроматической электромагнитной волны: $\text{div}\vec{A}(\vec{r}, t) = 0$. Электромагнитная волна, состоящая из фотонов, не может иметь любую интенсивность.

13. Квантовые переходы происходят в состоянии, обладающие энергией излучения и поглощения фотона: $E_f = E_i + \hbar\omega$ и плотностью $\rho_f(E_i, E_f)$ (E_i, E_f — собственные значения оператора H_0 , отвечающие собственным функциям Ψ_i и Ψ_f).

14. Векторный потенциал $\vec{A}(\vec{r}, t)$ плоской электромагнитной волны, не имеющей определённых момента количества движения и чётности, разлагается в ряд по состояниям с определёнными значениями момента количества движения J и чётности P по мультипольным волнам или мультиполям. Отдельные члены такого разложения будут отвечать электромагнитным волнам (фотонам) с определёнными значениями J и P , которые могут быть поглощены атомами и ядрами вещества.

15. Использование идеи российских учёных о наличии постоянно изменяющегося во времени и пространстве собственного орбитального заряда фотона легло в основу создания сверхмощного (до 1 МВт) и дальнего действующего (до 220 км) боевого лазера.

16. Скорость передачи узкокогерентным пучком фотонов модулированной бит-информации в 1010 раз больше, чем при передаче аналогичной цифровой информации с использованием электронов в качестве основных носителей заряда и переносчиков информации от источника (передатчика) к потребителям (приёмникам).

Библиографические ссылки

1. Федоров Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение. М.: Изд-во ДОСААФ, 1988. 192 с.
2. Абрамов А.И., Иванов Б.И. и др. Основные тенденции развития датчиков лазерного излучения // Контенант. 2015. № 3. С. 19—26.

3. **Лазарев Л.П.** Оптико-электронные приборы наведения. М.: Машиностроение, 1989. 512 с.
4. **Айрапетян В.С., Ушаков О.К.** Физика лазеров. Новосибирск, СГГА, 2012. 134 с.
5. **Леонович В.Н.** Фотон квантовый. Информация к размышлению [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.proza.ru/avtor/vleonovich> (дата обращения: 10.03.2020).
6. **Прохоров А.М.** и др. Физический энциклопедический словарь / под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
7. **Леонович В.Н.** Концепция физической модели квантовой гравитации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.proza.ru/2011/01/12/1571> (дата обращения: 10.03.2020).
8. **Ораевский А.Н.** Сверхсветовые волны в усиливающих средах / Успехи физических наук. М.: ФИАН. 1998. Т. 168. № 12. С. 1311—1321.
9. **Леонович В.Н.** Импульс фотона, фотонный двигатель и философия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/13311.html> (дата обращения: 10.03.2020).
10. **Костюшко В.Е.** Экспериментальная ошибка П.Н. Лебедева — причина ложного вывода об обнаружении им давления света // Доклады русскому физическому обществу. Энциклопедия русской мысли. М.: Общественная польза, 2012. Т. 16. Ч. 3. С. 34.
11. **Эткин В.А.** Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). СПб.: Наука, 2008. 409 с.
12. **Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П.** Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. М.: Радиотехника, 2009. 744 с.
13. **Прохоров А.М.** и др. Справочник по лазерам / под ред. А.М. Прохорова; пер. с англ. Т. 1, 2. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
14. **Звелто О.** Принципы лазеров / пер. с англ. М.: Мир, 1990. 558 с.
15. **Мэйтленд А., Дан М.** Введение в физику лазеров / пер. с англ. М.: Наука, 1978. 407 с.
16. **Шноль С.Э.** Космофизические факторы в случайных процессах / Svenska fysikarkivat. Stockholm, 2009. 388 с.
17. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 8, 9. Квантовая механика. М.: Мир, 1966. 528 с.

Ссылка для цитирования

Григорьев-Фридман С.Н. Новый взгляд на физические и квантовые свойства фотона // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 448—458.

УДК 681.513

Б.В. Севернов, В.В. Севернов

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

bsevernov@gmail.com

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ РЕШАЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ

Рассмотрена задача формирования алгоритмического обеспечения навигационного комплекса беспилотной машины. Исследован алгоритм классификации поверхностей, предложен способ построения деревьев решений на основе реальных данных с IMU (Inertial Measurement Unit). Разработаны алгоритм классификации поверхностей, метрики качества и матрица ошибок модели.

Ключевые слова: беспилотная машина; машинное обучение; деревья решений; классификация; критерии информативности; критерий Джини; энтропийный критерий; метрики качества модели; матрица ошибок модели.

The problem of the algorithmic support formation for the navigation complex of an unmanned vehicle is considered. The surface classification algorithm is researched, a method for constructing decision trees based on real data with an IMU (Inertial Measurement Unit) is proposed. The surface classification algorithm, quality metrics and model error matrix are developed.

Keywords: unmanned vehicle; machine learning; decision trees; classification; information content criteria; Gini test; entropy criterion; model quality metrics; matrix of model errors.

Введение. В настоящее время большинство методов навигации беспилотных машин основано на внешних источниках информации — GPS (*Global positioning system*) или ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система). GPS и ГЛОНАСС яв-

ляются системами, подверженными активным и пассивным помехам. Слабая помехозащищённость существенно ограничивает их использование в качестве источников информации для большинства типов беспилотных машин.

Точность навигации беспилотных машин может быть улучшена с помощью автономных источников информации, которые устанавливаются на машину и в меньшей степени зависят от внешних условий функционирования. Такими источниками информации могут быть инерциальные навигационные системы (ИНС) и IMU (*Inertial Measurement Unit*) [1—3].

С течением времени погрешности ИНС нарастают, поэтому их компенсируют с другими источниками информации [4]. Используемые навигационные системы объединяются в навигационные комплексы [5—7]. Обычно измерительные системы навигационного комплекса работают на различных физических принципах, используют разнообразные информационные поля [8, 9]. При выборе информационных полей, которые используются для навигации беспилотных автомобилей, часто применяют различные карты поверхностей. Так как карты могут содержать информацию о типах поверхностей, то данные с GPS можно сделать более достоверными, поместив на машину автономные источники информации, которые будут обнаруживать переходы на другие типы поверхностей, тем самым фиксируя местоположение на карте. Для обнаружения таких переходов необходимо решить задачу классификации поверхностей [10].

В настоящей статье для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм машинного обучения — дерева решений. Этот алгоритм был выбран, так как он имеет следующие преимущества:

- модель деревьев решений интуитивна, понятна и проста для объяснения техническим командам, а также заинтересованным сторонам;

- не требует больших вычислительных мощностей;

- может обучаться на небольших выборках данных.

Определение решающего дерева. Рассмотрим бинарное дерево, в котором каждой внутренней вершине v приписана функция (или предикат) $\beta_v : X \rightarrow \{0, 1\}$, а каждой листовой вершине v приписан прогноз $C_v \in Y$ (в случае с классификацией листу также может быть приписан вектор вероятностей).

Рассмотрим алгоритм, который начинается из корневой вершины v_0 и вычисляет значение функции β_{v_0} . Если оно равно нулю, то алгоритм переходит в левую дочернюю вершину (иначе в правую), вычисляет значение предиката в новой вершине и делает переход влево или вправо. Процесс продолжается,

пока не будет достигнута листовая вершина; алгоритм возвращает тот класс, который приписан этой вершине. Такой алгоритм называется бинарным решающим деревом.

На практике в большинстве случаев используются одномерные предикаты β_v , которые сравнивают значение одного из признаков с порогом:

$$\beta_v(x; j, t) = [x_j < t]. \quad (1)$$

Также существуют и многомерные предикаты, которые позволяют строить ещё более сложные разделяющие поверхности, но на практике используются редко.

Построение деревьев. Для любой выборки можно построить решающее дерево, не допускаяющее на ней ни одной ошибки. Даже с простыми одномерными предикатами можно сформировать дерево, в каждом листе которого находится ровно по одному объекту выборки. Скорее всего, это дерево будет переобученным и не сможет показать хорошее качество на новых данных.

Можно было бы поставить задачу поиска дерева, которое является минимальным (с точки зрения количества листьев) среди всех деревьев, не допускающих ошибок на обучении — в этом случае можно было бы надеяться на наличие у дерева обобщающей способности. К сожалению, эта задача является NP-полной, и поэтому приходится ограничиваться «жадными» алгоритмами построения дерева.

Опишем базовый «жадный» алгоритм построения бинарного решающего дерева. Начнём со всей обучающей выборки X и найдём наилучшее её разбиение на две части:

$$R_1(j, t) = \{x | x_j < t\}; \quad (2)$$

$$R_2(j, t) = \{x | x_j \geq t\}. \quad (3)$$

Разбиение производится с точки зрения заранее заданного функционала качества $Q(X, j, t)$. Найдя наилучшие значения j и t , создадим корневую вершину дерева, поставив ей в соответствие предикат $[x_j < t]$. Объекты разобьются на две части — одни попадут в левое поддерево, другие — в правое.

Для каждой из этих подвыборок рекурсивно повторим процедуру, построив дочерние вершины для корневой, и т. д. В каждой вершине проверяем, не выполнилось ли некоторое условие останова (если выполнилось, то прекращаем рекурсию и объявляем эту вер-

шину листом). Когда дерево построено, каждому листу ставится в соответствие ответ.

В случае с классификацией это может быть класс, к которому относится больше всего объектов в листе, или вектор вероятностей (скажем, вероятность класса может быть равна доле его объектов в листе). Решающие деревья могут обрабатывать пропущенные значения — ситуации, в которых для некоторых объектов неизвестны значения одного или нескольких признаков. Для этого необходимо модифицировать процедуру разбиения выборки в вершине, что можно сделать несколькими способами. После того, как дерево построено, можно провести его стрижку — удаление некоторых вершин для понижения сложности и повышения обобщающей способности.

Таким образом, конкретный метод построения решающего дерева определяется видом предикатов в вершинах, функционалом качества $Q(X, j, t)$, критерием останова, методом обработки пропущенных значений, методом стрижки.

Критерии информативности. При построении дерева необходимо задать функционал качества, на основе которого осуществляется разбиение выборки на каждом шаге. Обозначим через R_m множество объектов, попавших в вершину, разбиваемую на данном шаге, а через R_l и R_r — объекты, попадающие в левое и правое поддерево при заданном предикате.

Использованы функционалы следующего вида:

$$Q(R_m, j, s) = H(R_m) - \frac{|R_l|}{|R_m|} H(R_l) - \frac{|R_r|}{|R_m|} H(R_r), \quad (4)$$

где $H(R)$ — критерий информативности (*impurity criterion*), который оценивает качество распределения целевой переменной среди объектов множества R .

Чем меньше разнообразие целевой переменной, тем меньше должно быть значение критерия информативности, поэтому будем пытаться минимизировать его значение. Функционал качества $Q(R_m, j, s)$ при этом будем максимизировать. Как уже отмечалось, в каждом листе дерево будет выдавать константу — вещественное число, вероятность или класс.

Исходя из этого, можно предложить оценивать качество множества объектов R тем, насколько хорошо их целевые переменные предсказываются константой (при оптимальном выборе этой константы):

$$H(R) = \min_{c \in Y} \frac{1}{|R|} \sum_{(x_i, y_i) \in R} L(y_i, c), \quad (5)$$

где $L(y, c)$ — некоторая функция потерь.

Классификация. Обозначим через p_k долю объектов класса k ($k \in \{1, \dots, K\}$), попавших в вершину R :

$$p_k = \frac{1}{|R|} \sum_{(x_i, y_i) \in R} [y_i \neq k]. \quad (6)$$

Через k_* обозначим класс, представитель которого оказалось больше всего среди объектов, попавших в данную вершину: $k_* = \arg \max_k p_k$.

Ошибка классификации. Рассмотрим индикатор ошибки как функцию потерь:

$$H(R) = \min_{c \in Y} \frac{1}{|R|} \sum_{(x_i, y_i) \in R} [y_i \neq c]. \quad (7)$$

Оптимальным предсказанием будет наиболее популярный класс k_* , следовательно, критерий будет равен следующей доле ошибок:

$$H(R) = \frac{1}{|R|} \sum_{(x_i, y_i) \in R} [y_i \neq k_*] = 1 - p_{k_*}. \quad (8)$$

Данный критерий является достаточно грубым, поскольку учитывает частоту p_{k_*} лишь одного класса.

Критерий Джини. Рассмотрим ситуацию, в которой выдадим в вершине не один класс, а распределение на всех классах $c = (c_1, \dots, c_K)$, $\sum_{k=1}^K c_k = 1$.

Качество такого распределения можно измерять, например, с помощью критерия Бриера:

$$H(R) = \min_{\sum_{k=1}^K c_k = 1} \frac{1}{|R|} \sum_{(x_i, y_i) \in R} \sum_{k=1}^K (c_k - [y_i = k])^2. \quad (9)$$

Можно показать, что оптимальный вектор вероятностей состоит из долей классов p_k :

$$c_* = (p_1, \dots, p_K). \quad (10)$$

Если подставить эти вероятности в исходный критерий информативности и провести ряд преобразований, то получим критерий Джини:

$$H(R) = \sum_{k=1}^K p_k (1 - p_k). \quad (11)$$

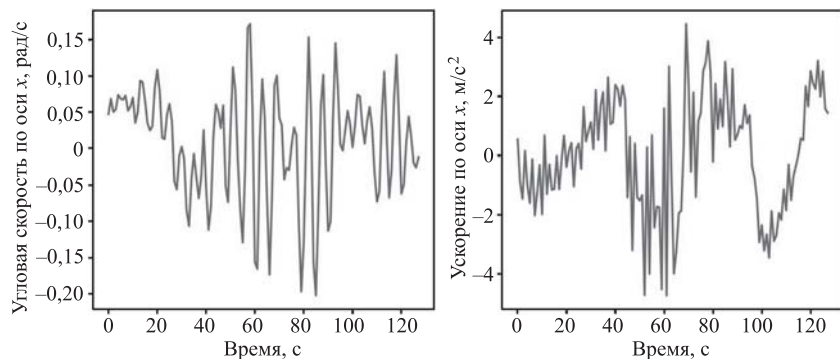


Рис. 1. Пример данных с датчика IMU

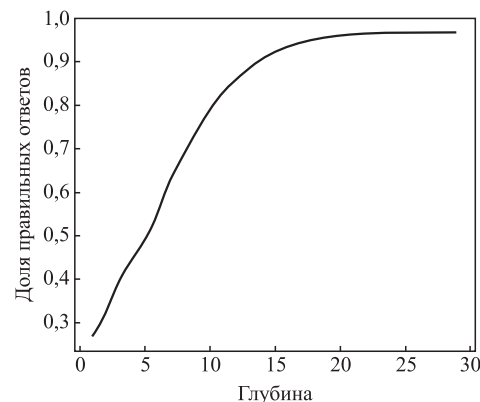


Рис. 2. Зависимость доли правильных ответов алгоритма от глубины дерева

Энтропийный критерий. Энтропия Шеннона определяется для системы с K возможными состояниями следующим образом:

$$H(R) = - \sum_{k=1}^K p_k \log p_k, \quad (12)$$

где p_k — вероятности нахождения системы в k -м состоянии.

Из теории вероятностей известно, что энтропия ограничена снизу нулём, причём минимум достигается на вырожденных распределениях ($p_i = 1, p_j = 0$ для $i \neq j$). Максимальное же значение энтропия принимает для равномерного распределения. Отсюда видно, что энтропийный критерий отдаёт предпочтение более «вырожденным» распределениям классов в вершине.

Экспериментальная часть.

В экспериментальной части стоит задача предсказания поверхности, по которой движется робот, используя данные с датчика IMU-XSENS MTi-300 [11]. Набор данных содержит информацию об ориентации, угловой скорости и линейном ускорении робота, который движется по 9 различным типам поверхностей. Пример данных, полученных с IMU, на которых обучалась модель, представлен на рис. 1.

Так как данные сбалансированы, то для оценки качества модели будем использовать такую метрику качества, как Accuracy. Данная метрика вычисляет процент (долю в диапазоне от 0 до 1) правильно классифицированных объектов.

Очевидно, что доля правильных ответов алгоритма возрастает с увеличением глубины дерева (рис. 2). При глубине, равной 30, доля правильных ответов алгоритма составит 96 %.

Для более наглядного представления результатов моделирования была построена матрица ошибок (рис. 3).

На диагональных элементах представленной матрицы показано количество правильно классифицированных объектов. Видно, что модель довольно точно классифицирует поверхности и редко ошибается.

Выводы. Исследована задача классификации поверхностей методом решающих деревьев. Алгоритм используется в навигационном комплексе беспилотной машины для

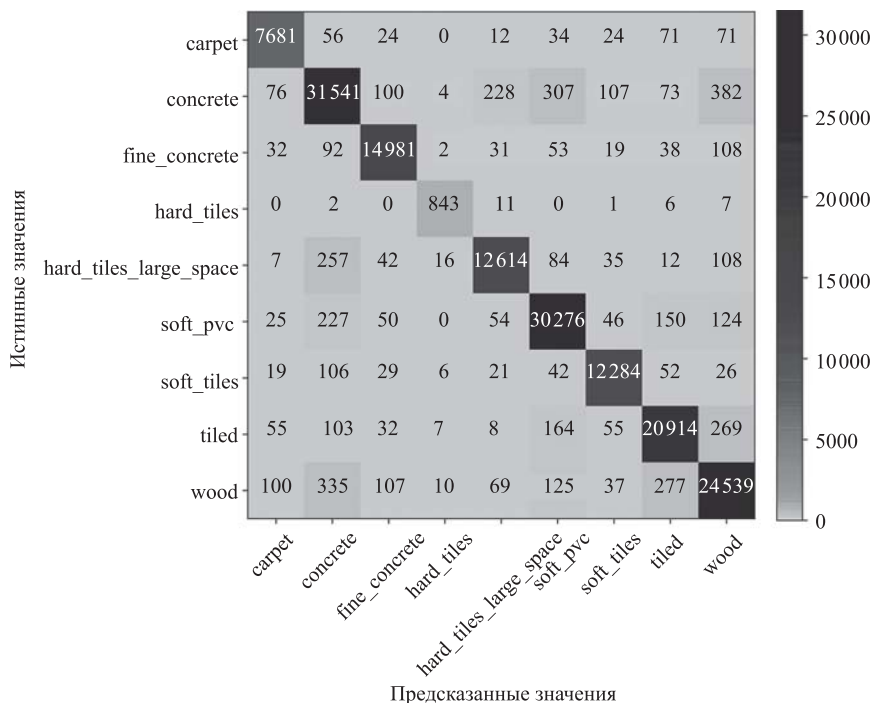


Рис. 3. Матрица ошибок для дерева глубины 30

обработки информации измерительных систем. Применение разработанного алгоритма позволит повысить точность навигационных определений беспилотной машины. Анализ результатов моделирования показал, что деревья решений с довольно высокой точностью способны классифицировать поверхности.

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А., Чан Нгок Хьонг.** Исследование алгоритмического метода коррекции автономных навигационных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 1. С. 29—33.

2. **Неусыпин К.А.** Алгоритмические методы повышения точности автономных навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 2. С. 16—19.

3. **Агеев В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.

4. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.

5. **Proletarsky A.V., Neusyypin K.A.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 1. P. 75—79.

6. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.

7. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.

8. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.

9. **Шахтарин Б.И., Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

10. **Lomio F., Skenderi F., Mohamadi D., Collin J., Ghabcheloo R., Huttunen H.** Surface Type Classification for Autonomous Robot Indoor Navigation. Tampere University, Finland, 2019. 5 p.

11. **CareerCon 2019 — Help Navigate Robots.** Режим доступа: <https://www.kaggle.com/c/career-con-2019/notebooks> (дата обращения: 01.03.2020).

Ссылка для цитирования

Севернов Б.В., Севернов В.В. Решение задачи классификации поверхностей методом решающих деревьев // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 458-462.



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 авиационного строения.

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

УДК 681.513

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-10-463-469

Ц. Ху, В.В. Клычников, А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф.,
К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **М.С. Селезнева**, канд. техн. наук
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
hqchqc3@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ БИНС НИЗКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОЙ МАШИНЫ

Исследована малогабаритная инерциальная навигационная система Gyrolab GL VG 109. Показано, что система обладает низкой точностью, поэтому применять её для определения параметров беспилотного автомобиля в автономном режиме нельзя. Коррекция системы от спутниковой навигационной системы существенно повышает точность определения параметров беспилотного автомобиля, но только в условиях устойчивых сигналов спутниковой навигационной системы (СНС). Сформировано алгоритмическое обеспечение системы коррекции навигационной системы на базе скалярного адаптивного алгоритма оценивания и процедуры идентификации. Использование алгоритмической коррекции БИНС от СНС с помощью алгоритма оценивания позволяет достичь точности, которая соответствует системам третьего класса точности.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система; беспилотный автомобиль; коррекция; спутниковая навигационная система; алгоритм скалярного оценивания; скалярная идентификация; анализ точности.

A small-sized inertial navigation system (SINS) Gyrolab GL VG 109 is researched. It is shown that this system has low accuracy; therefore it cannot be used to determine the parameters of an unmanned vehicle in an autonomous mode. Correction of the system from the satellite navigation system significantly increases the accuracy of determining the parameters of an unmanned vehicle, but only under conditions of stable signals from the satellite navigation system (SNS). The algorithmic support for the correction facility of the navigation system based on the scalar adaptive estimation algorithm and identification procedure is formed. The use of algorithmic correction of SINS from SNS using an estimation algorithm allows achieving an accuracy that corresponds to systems of the third accuracy class.

Keywords: inertial navigation system without platform; unmanned vehicle; correction; satellite navigation system; scalar estimation algorithm; scalar identification; analysis of accuracy.

Введение. Объектом исследования в статье является малогабаритная бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) низкого класса точности. Такие БИНС устанавливаются на динамические объекты с ограниченным жизненным циклом: малые беспилотные летательные аппараты и беспилотные машины (БМ), часто одноразового действия. Такие динамические объекты используются для исследования поверхности в условиях химического и радиационного заражения местности, при разминировании, в качестве вспомогательных средств при пожаротушении, природных катаклизмах, в условиях техногенных катастроф. Управление БМ осуществляется на основе информации от БИНС третьего класса точности [1].

Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволили существенно снизить стоимость БИНС. Поэтому при проектировании БМ ограниченного срока жизни обычно

выбирают дешёвые низкоточные БИНС, построенные на МЭМС-элементах. Однако из-за нестабильности МЭМС-элементов точность БИНС может изменяться в широком диапазоне. Следствием этого является необходимость устанавливать на БМ более дорогие БИНС.

Измерительные сигналы БИНС имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования БМ. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование причин возникновения погрешностей и последующую их компенсацию алгоритмическим путём [2—5].

В статье исследованы погрешности низкоточной БИНС и представлен метод повышения точности с помощью алгоритма оценивания. С помощью низкоточной БИНС, спутниковых навигационных систем (СНС) и алгоритмов коррекции удаётся получать навигационную информацию более высокого класса точности.

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы и модель погрешностей. БИНС для получения навигационной информации относительно выбранной системы координат моделируют математический маятник с периодом Шуллера посредством информации о линейных ускорениях и угловых скоростях несущего объекта. БИНС могут включать акселерометры, которые жёстко крепятся на борту БМ, либо перемещаются по заданному закону, или акселерометры и измерители, а также измерители угловых скоростей.

Достоинствами БИНС по сравнению с платформенными ИНС обычно считаются большая надёжность, простота эксплуатации и меньшая стоимость. Хотя требования к точностным характеристикам акселерометров и гироскопов более высокие, так как чувствительные элементы БИНС жёстко закреплены непосредственно на корпусе, БМ находятся в чрезвычайно жёстких условиях эксплуатации.

Используются различные схемы построения БИНС с помощью акселерометров и гироскопов. Наибольший интерес представляют схемы, построенные на шести акселерометрах или трёх акселерометрах и двух трёхстепенных гироскопах.

Для построения БИНС, чтобы ошибки быстро не возрастали, должны использоваться прецизионные акселерометры и гироскопы, а также требуется наличие на борту вычислительной машины с большой скоростью счёта для проведения значительного объёма вычислений.

Создание принципиально новых типов гироскопов и широкое внедрение бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) повышенной производительности открыли большие возможности для проектирования надёжных и экономичных ИНС, чувствительные элементы которых устанавливаются непосредственно на корпусе БМ.

В практических приложениях для построения БИНС используются различные типы гироскопов (лазерные, волоконно-оптические, с электростатическим подвесом, пьезоэлектрические, вибрационно-резонансные и др.). Появление МЭМС-технологий позволило существенно снизить стоимость БИНС. Но точность БИНС на МЭМС-элементах также существенно снизилась.

БИНС имеют методические и инструментальные погрешности. Основным недостатком БИНС является нарастание этих погрешностей с течением времени. Для повышения точности

БИНС обычно используются какие-либо датчики внешней навигационной информации. Коррекция БИНС БМ часто осуществляется с помощью системы GPS. Однако сигналы GPS также содержат ошибки, обусловленные слабой помехозащищённостью канала передачи информации. Поэтому сигналы БИНС и GPS обычно подвергаются совместной обработке в БЦВМ. Сравнение сигналов БИНС и GPS позволяет выделить смесь ошибок этих систем. Сигнал, пропорциональный этим ошибкам, используется в качестве входного сигнала алгоритма оценивания. С помощью алгоритма оценивания осуществляется вычисление ошибок БИНС, а ошибки GPS отфильтровываются. Выделить из смеси ошибок сигнал, пропорциональный ошибкам БИНС, удаётся на том основании, что сигналы GPS и БИНС имеют различную физическую природу. Сигнал БИНС имеет низкочастотный характер, а сигнал GPS содержит явно выраженную высокочастотную составляющую. В алгоритме оценивания ошибки GPS принимаются за измерительный шум и подавляются. С выхода алгоритма оценивания сигнал, пропорциональный ошибке БИНС, поступает в выходной сигнал БИНС, где алгебраически вычитается из информационного сигнала, пропорционального местоположению и скорости БМ. Таким образом, осуществляется коррекция навигационной информации, получаемой с помощью БИНС.

Главным преимуществом автономных ИНС является их инвариантность к горизонтальным ускорениям. Однако погрешности автономных ИНС, обусловленные дрейфом гироскопов, смещением нуля и дрейфом акселерометров, а также другими возмущающими факторами, достигают значительных величин.

Погрешности БИНС можно разделить на два типа: методические и инструментальные.

Методические погрешности БИНС обусловлены способом проведения измерений. К ним обычно относят ошибки, вызываемые, например, неточным знанием структуры и параметров гравитационного поля Земли и количественных характеристик её формы. Сюда же следует отнести погрешности, обусловленные упрощением алгоритмов. Обычно основная часть методических погрешностей успешно компенсируется.

К инструментальным ошибкам, возникающим вследствие погрешностей инерциальных датчиков и вычислительного устройства, относятся, например, случайный дрейф гироскопов, нестабильность масштабных ко-

эффицентом датчиков момента гироскопов и акселерометров, погрешности передачи информации, погрешности выполнения посадочных баз под инерциальные датчики, нестабильность взаимного положения этих баз, погрешности начальной выставки БИНС и др.

Рассматривая реакцию автономной БИНС на определённые возмущающие факторы, можно сделать выводы о характере погрешностей БИНС.

Доминирующее влияние на суммарную погрешность БИНС в определении пройденного пути оказывает скорость дрейфа гироскопов. Систематическая скорость дрейфа гироскопов вызывает нарастающую со временем составляющую погрешности БИНС, а также колебательную составляющую с периодом Шулера.

Нарастающая с течением времени скорость дрейфа обуславливает появление погрешности БИНС, которую также можно представить в виде двух составляющих. Первая составляющая изменяется пропорционально квадрату времени функционирования БИНС, а вторая — совершает колебания с периодом Шулера.

Модель погрешностей одного горизонтального канала БИНС выражается в виде [6]

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1}, \quad (1)$$

где x_k — ошибки ИНС; Φ — матрица модели; W_{k-1} — вектор входного шума, дискретный аналог белого гауссового шума.

Уравнение измерений имеет вид (2). Предполагается, что измеряется только первая компонента вектора состояния, т. е.

$$z_k = Hx_k + V_k, \quad (2)$$

где z_k — вектор измерений; $H = [1 \ 0 \ 0]$; V_k — измерительный шум, который представляет собой дискретный аналог белого гауссового шума; W_{k-1} и V_k — независимые процессы.

Приведённые уравнения ошибок БИНС в дискретной форме используются в дальнейшем в алгоритме оценивания.

На каком бы движущемся объекте ни была установлена БИНС, принцип её работы сохраняется неизменным: координаты объекта определяют, интегрируя уравнения движения его центра масс в инерциальной системе координат. Ускорение центра масс измеряют акселерометрами, ориентация осей чувствительности которых осуществляется с помощью

гироскопов. В то же время разнообразие объектов, различие их траекторий, параметров и времени движения обуславливают существенные особенности БИНС как в теории, так и при их технической реализации.

Одна из основных характеристик БИНС — время работы, т. е. время непрерывного решения навигационных задач. При длительной работе БИНС возникает необходимость в калибровке и последующем учёте параметров дрейфа гироскопов, коэффициентов передачи и смещения нулей акселерометров. Часто это выполняют непосредственно на движущемся объекте при работающей БИНС.

Алгоритмическая коррекция БИНС. Коррекция БИНС от внешних источников информации с применением различных алгоритмов позволяет существенно снизить погрешности получаемой навигационной информации. В качестве примера использования алгоритмов для коррекции навигационной информации рассмотрим БИНС с внешним источником информации, в качестве которого применяется СНС.

Для наиболее полной компенсации погрешностей в выходной информации необходимо предварительно оценить ошибки БИНС, воспользовавшись алгоритмами оптимального оценивания. Алгоритм оценивания вычисляет все оценки ошибок БИНС.

Входным сигналом для алгоритма оценивания является разность в измерении скорости с помощью БИНС и СНС. Ошибки БИНС составляют вектор состояния системы и включают ошибки по скорости, углу и дрейфу гироскопов, а ошибки СНС представляют собой измерительный шум.

После обработки измерений на выходе алгоритма оценивания получаем оценку вектора состояния, т. е. оценку всех наблюдаемых ошибок БИНС. Далее оценка ошибок БИНС алгебраически вычитается из выходного сигнала БИНС, состоящего из достоверной информации о скорости, местоположении объекта и ошибок БИНС. Тем самым в выходном сигнале компенсируются ошибки БИНС в определении навигационных параметров.

Оценку ошибок БИНС можно использовать в регуляторе для компенсации ошибок по скорости, углу и дрейфу гироскопов в структуре БИНС, уменьшая тем самым амплитуду колебаний ошибок и улучшая качество переходного процесса. Схема подключения к БИНС алгоритма оценивания (АО) представлена на рис. 1.

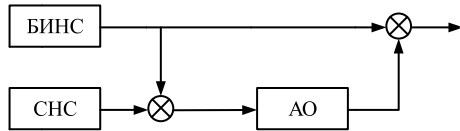


Рис. 1. Схема подключения алгоритма оценивания к ИНС

Применение схемы (см. рис. 1) предполагает использование нерасходящихся высокоточных алгоритмов оценивания, требующих малого объёма машинной памяти, которые легко могут быть реализованы на БЦВМ.

Использование для повышения точности навигационной информации алгоритмов оценивания позволяет проводить коррекцию в выходном информационном сигнале, не вмешиваясь в динамику БИНС.

В настоящее время для коррекции БИНС БМ обычно предлагается использовать классические алгоритмы оценивания. Как правило, это фильтр Калмана и его различные адаптивные модификации [2—5]. Однако при появлении в сигналах СНС аномальных изменений эти фильтры не позволяют проводить эффективную коррекцию БИНС БМ.

Адаптивное оценивание. Адаптивные АО, являющиеся прямыми модификациями фильтра Калмана, работают аналогичным образом. Отличие заключается в адаптивном определении ковариационных матриц входного и измерительного шумов.

Уравнение оценки состояния системы \hat{x} имеет вид [4, 5]

$$\hat{x}_{k+1} = x_{k+1,k} + K_{k+1}[z_{k+1} - H_{k+1}x_{k+1,k}], \quad (3)$$

где K_{k+1} — оптимальная матрица коэффициентов усиления.

Адаптивный АО, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном шуме, имеет вид (3) и следующие уравнения [6]:

$$P_{k+1,k} = \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T + K_k M[v_{k+1} v_{k+1}^T] K_k^T; \quad (4)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1,k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1}; \quad (5)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1,k} [I - K_{k+1} H_{k+1}], \quad (6)$$

где $P_{k+1,k}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; P_{k+1} — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания.

Адаптивный АО, способный функционировать в условиях отсутствия априорной ин-

формации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов, имеет следующий вид:

$$K_{k+1} = \begin{cases} P_{k+1,k} H_{k+1}^T [M(\bar{v}_{k+1} v_{k+1}^T)]^{-1}; \\ P_{k+1,k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \text{diag}[M(\bar{v}_{k+1} v_{k+1}^T)] > \text{diag} H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T; \\ \text{diag}[M(\bar{v}_{k+1} v_{k+1}^T)] \leq \text{diag} H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T. \end{cases}$$

Вычисление математического ожидания в адаптивном АО производится в соответствии со следующей формулой:

$$M(\bar{v}_k v_k^T) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (v_j v_j^T). \quad (8)$$

Адаптивный скалярный алгоритм оценивания. На основе алгоритма скалярного оценивания, изменяющейся во времени составляющей вектора состояния, в условиях, когда информация о некоторых переменных состояния непосредственно измеряется, целесообразно использовать адаптивную модификацию фильтра Калмана следующего вида [7]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{nk+1}^i &= a_{ii} \hat{x}_{n(k-1)+1}^i + s_k^i + u_{n(k-1)+1}^i + \\ &+ k_{k+1}^i (z_{k+1}^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{n(k-1)+1}^i - s_k^i - u_{n(k-1)+1}^i), \end{aligned} \quad (9)$$

где \hat{x}_{nk+1}^i — оценка i -й компоненты вектора состояния; $u_{n(k-1)+1}^i$ — сумма произведений элементов i -й строки обратной матрицы наблюдаемости на компоненты вектора состояния (кроме i -й компоненты x); a_{ii} — i -й элемент i -й строки обратной матрицы наблюдаемости; $s_k^i = a_{i1} z_k^{*1} + a_{i2} z_k^{*2} + \dots + a_{in} z_k^{*n}$.

Дисперсия оценивания ошибки и коэффициента усиления фильтра примут вид

$$p_{k,k-1}^i = a_{ii}^2 p_{k-1}^i + (k_{k-1}^i)^2 (J_k^i)^2; \quad (10)$$

$$k_k^i = \frac{p_{k,k-1}^i}{p_{k,k-1}^i + \hat{r}_k^i}; \quad (11)$$

$$p_k^i = (1 - k_k^i) p_{k,k-1}^i, \quad (12)$$

где дисперсия измерительного шума \hat{r}_k^i определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{r}_k^i = (J_k^i)^2 - p_{k,k-1}^i; (J_k^i)^2 > p_{k,k-1}^i; \\ \hat{r}_k^i = 0; (J_k^i)^2 \leq p_{k,k-1}^i, \end{cases} \quad (13)$$

где J_k^i — обновляемая последовательность в адаптивном скалярном алгоритме фильтрации получена по формуле

$$J_k^i = z_k^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{k-1}^i - s_{k-1}^i - u_{k-1}^i. \quad (14)$$

Предложенный алгоритм оценивания способен функционировать в условиях отсутствия априорной информации о дисперсиях входного и измерительного шумов. Использование в алгоритме жёсткой обратной связи по обновляемой последовательности J позволяет осуществлять оценивание высокодинамичных объектов. При этом точность оценивания (в случае, когда дисперсия измерительного шума по величине соизмерима с оцениваемым номиналом) несколько снижается. В то же время при неточном значении информации о модели исследуемого процесса жёсткая обратная связь по J позволяет получать нерасходящуюся оценку i -й компоненты вектора состояния.

Коэффициент скалярной модели подлежит идентификации посредством какого-либо алгоритма [6—8]. Для повышения точности оценивания можно использовать более сложную модель.

Введём следующие обозначения:

$$[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] = H\Phi^n \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \dots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}^{-1}; \quad (15)$$

$$\mathbf{v}_1^0 = b_1W_1 + b_2W_2 + \dots + b_nW_n - a_1V_1 - a_2V_2 - \dots - a_nV_n + V_{n+1} = \quad (16)$$

$$= H\Phi^n \begin{bmatrix} H \\ H\Phi \\ \dots \\ H\Phi^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ HW_1 \\ H\Phi W_1 + HW_2 + V_3 \\ \dots \\ H\Phi^{n-2}W_1 + \dots + V_n \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение скалярных измерений примет вид

$$z_{n+1} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} + \mathbf{v}_1^0. \quad (17)$$

Постановка задачи сводится к определению неизвестных элементов вектора-столбца $[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$ по измерениям (17).

Вектор неизвестных параметров в n подтактах проведения измерений в матричной форме имеет вид [7]:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & \dots & z_n \\ z_2 & \dots & z_{n+1} \\ z_3 & \dots & z_{n+2} \\ \dots & \dots & \dots \\ z_n & \dots & z_{2n-1} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} z_{n+1} \\ z_{n+2} \\ \dots \\ z_{2n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_1^0 \\ v_2^0 \\ \dots \\ v_n^0 \end{bmatrix} \right\}. \quad (18)$$

Таким образом, неизвестные параметры могут быть непосредственно измерены. По-

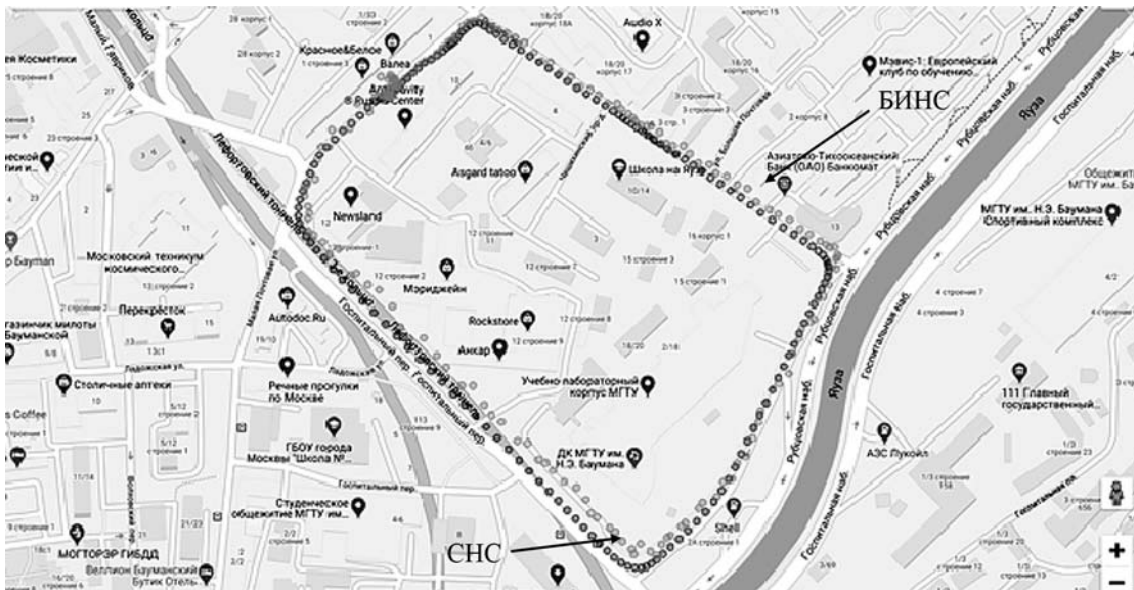


Рис. 2. Погрешность автономной БИНС при движении по маршруту 4,48 м

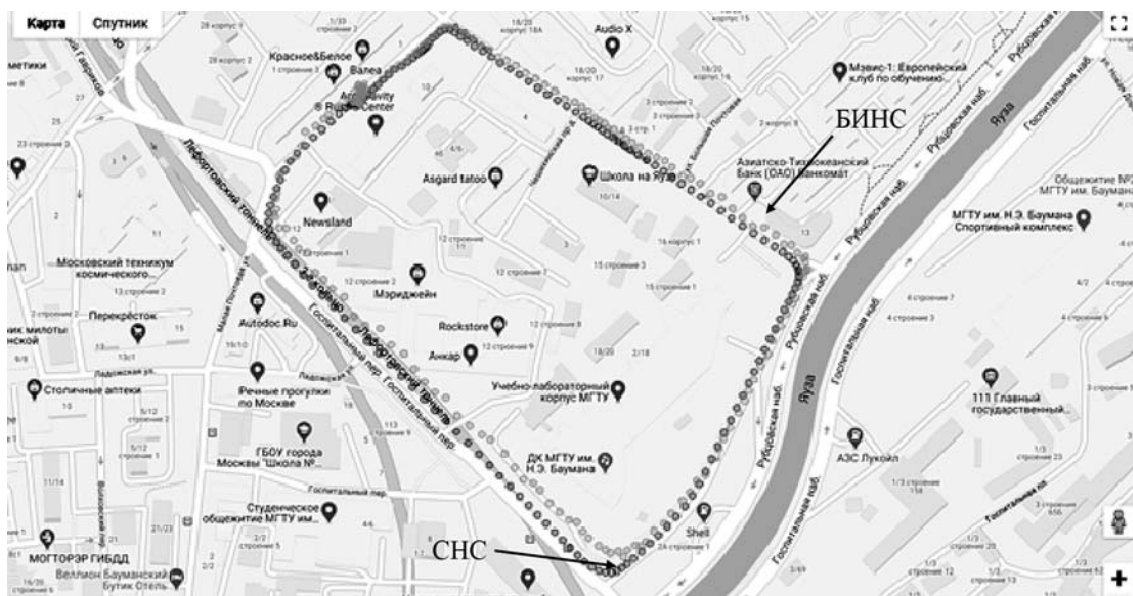


Рис. 3. Погрешность БИНС с коррекцией от СНС 3,16 м



Рис. 4. Погрешность БИНС с коррекцией от СНС с ФК в случае присутствия в измерениях 15 % аномальных выбросов 1,53 м

грешности скалярных измерений превышают исходный измерительный шум в уравнении (2). Поэтому целесообразно проводить сглаживание скалярных измерений [6, 7].

Экспериментальные исследования БИНС и алгоритмов оценивания. Для моделирования в алгоритме оценивания использована математическая модель погрешностей БИНС (1).

Погрешности БИНС в различных условиях измерений приведены на рис. 2–6.

Заключение. Проведено исследование малогабаритной БИНС низкой точности, устанавливаемой на БМ ограниченного жизненного цикла. Разработан алгоритм коррекции

БИНС с учётом особенностей функционирования БМ. Применение алгоритмической коррекции БИНС от СНС с адаптивным скалярным алгоритмом оценивания позволило получать навигационную информацию более высокого класса точности. Таким образом, появилась возможность вместо БИНС второго класса точности использовать более дешёвую БИНС третьего класса точности с алгоритмической коррекцией, которая имеет такую же точность, но существенно дешевле. Экспериментальные испытания продемонстрировали эффективность алгоритмической коррекции.

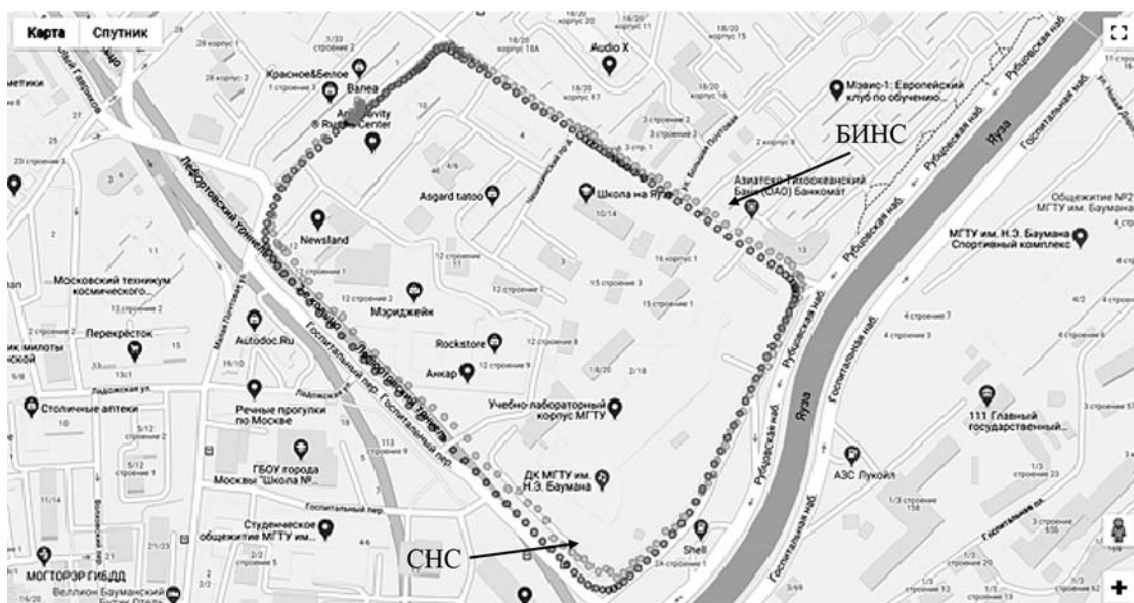


Рис. 5. Погрешность БИНС с СНС и ФК в случае присутствия в измерениях 40 % аномальных выбросов 2,84 м (хуже, чем на рис. 4, но лучше, чем на рис. 3)



Рис. 6. Погрешность БИНС с СНС и ФК с модификацией (9) 0,95 м

Библиографические ссылки

1. **Матвеев В.В.** Инерциальные навигационные системы: учебное пособие. Тула: ТулГУ, 2012. 199 с.
2. **Selezneva M.S., Neusyrip K.A.** Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.
3. **Кай Ш., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.
4. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME. Ser. D. Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. P. 35—45.
5. **Кузовков Н.Т., Салычев О.С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.

6. **Salychev O.S.** MEMS-based inertial navigation: Expectations and reality. M.: Bauman MSTU Press, 2012. 207 p.

7. **Салычев О.С.** Скалярное оценивание многомерных динамических систем. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.

8. **Verhaegen M., Verdult V.** Filtering and system identification: a least squares approach. Cambridge University Press, 2007.

Ссылка для цитирования

Ху Ц., Клычников В.В., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Исследование БИНС низкой точности для беспилотной машины // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 463—469. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-10-463-469.



УДК 681.51

С.Л. Зенкевич, А.В. Назарова, Ц. Хо

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Huojianwen2008@hotmail.com

ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Представлен метод управления движением группы мобильных роботов в среде с препятствиями. Разработаны механизмы планирования и координации поведения роботов на логическом уровне системы управления для обеспечения смены конфигурации группы при движении. В качестве компонентов логического уровня использован аппарат конечных автоматов. На тактическом уровне решена задача формирования закона управления движением в двух режимах: перестроения и движения с сохранением конфигурации. Для проверки работоспособности предложенного подхода разработана структурная схема моделирования и приведены результаты компьютерного моделирования в среде ros_stage.

Ключевые слова: группа роботов; логический уровень управления; конечный автомат; закон управления; режим перестроения; режим движения с сохранением конфигурации.

A method for controlling the movement of a mobile robots group in an environment with obstacles is represented. Mechanisms for planning and coordinating the behavior of robots at the logical level of the control system to ensure a change in the configuration of the group during movement are developed. The final automatic machine apparatus as the components of the logic level is used. At the tactical level, the problem of forming the law of motion control in two modes is decided: rebuilding and movement with preservation of the configuration. To test the availability of the proposed approach, a block diagram of modeling is developed and the results of computer modeling in the ros_stage environment are presented.

Keywords: group of robots; logical control level; final automatic machine; control law; rebuild mode; driving mode with saving configuration.

Введение. В последние годы часто возникает необходимость использования групп роботов различной специализации в поисково-спасательных операциях для быстрого обследования обширных территорий, пострадавших в результате природных или техногенных катастроф. В связи с этим вопросы изучения способов и методов управления группами объектов находят широкое применение. Из-за изменений внешней среды или смены поставленной задачи группе роботов трудно поддерживать определённую конфигурацию при выполнении необходимых действий. Поэтому возникает задача управления, реализующая заранее найденную последовательность действий по изменению конфигурации группы, либо в автономном режиме обеспечивающая перестроение группы в недетерминированной среде. Процесс изменения конфигурации должен учитывать и устранять возможности столкновений роботов при одновременном изменении их положений.

В последнее время разработаны различные стратегии управления перестроением групп

роботов с использованием централизованных, децентрализованных и гибридных систем. К ним относятся методы, реализующие иерархию уровней поведения [1], представление групп роботов в виде графов разной степени связности [2], использование стратегии «лидер—последователи» [3], аналоги метода потенциалов [4], а также стратегии «интеллектуального» управления на базе нейронных сетей, нечёткой логики и т. д. [5]. В таблице представлены сравнительные характеристики существующих методов.

Постановки задачи. Предположим, что группа из четырёх мобильных роботов (рис. 1) движется в плоскости OXY в соответствии с данными, получаемыми от камеры сопровождающего дрона [6]. Каждый робот группы имеет два симметрично расположенных ведущих колеса (левое и правое). Свяжем с роботами системы координат (СК) $O_iX_iY_i = \{1, 2, 3, 4\}$, выбрав в качестве начала системы точку O_i , лежащую в центре отрезка, соединяющего центры колёс, вектор X_i задаёт направление движения, а вектор Y_i дополняет СК до правой. Положе-

Сравнение методов управления группами роботов

Метод	Преимущества	Недостатки
Иерархическая структура уровней поведения	Высокая масштабируемость и локальность	Требование предварительного знания о типе поведения, низкая устойчивость управления конфигурацией группы
Представление группы роботов в виде графа	Высокая масштабируемость	Низкая гибкость
Реализация стратегии «лидер—последователи»	Простота реализации, высокая точность управления	Низкая надёжность
Аналог движения частиц в потенциальном поле	Простота реализации, в том числе предотвращение столкновений	Низкая устойчивость управления конфигурацией группы, возможность возникновения локальных колебаний
Стратегия «интеллектуально-го» управления	Высокие гибкость и масштабируемость	Высокая вычислительная сложность

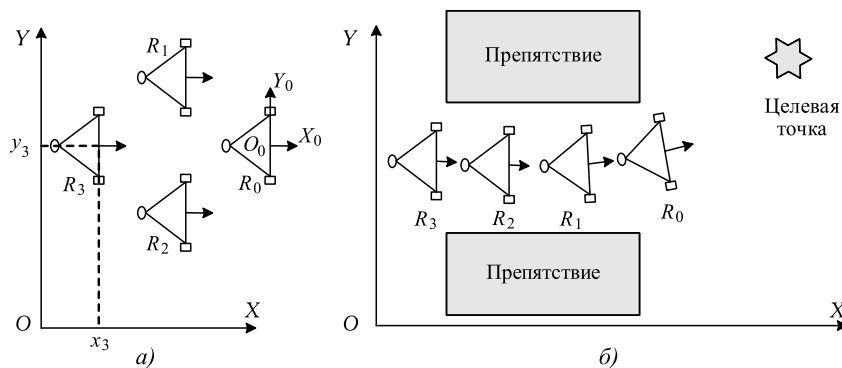


Рис. 1. Постановка задачи:
 а — $t = t_0$; б — $t = t_1$

ние группы F задаётся множеством декартовых координат роботов:

$$F = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}, \tag{1}$$

где n — количество роботов в группе; $r_i = (x_i, y_i)^T$ — координаты робота R_i в системе координат OXY .

Необходимо разработать стратегию управления перестроением группы роботов в среде с препятствиями, причём в зависимости от задачи, решаемой группой, возможны два варианта. В первом случае группа разделяется на отдельные роботы, каждый из которых выполняет объезд статических и динамических препятствий. После завершения соответствующих манёвров конфигурация группы восстанавливается и движение продолжается с сохранением конфигурации. Второй вариант возникает при транспортировке крупногабаритных грузов,

которые крепятся на отдельных мобильных роботах и образуют единую транспортную платформу. В этом случае все манёвры, в том числе объезд препятствий, должны выполняться согласованно всеми роботами группы с сохранением их взаимного положения. Данная статья посвящена решению первой задачи.

Структура системы управления.

Пусть в состав группы роботов входят дрон и несколько мобильных роботов (MP). На рис. 2 изображена структура системы управления группой роботов. Верхний уровень представляет собой управляющий центр, в состав которого входят блок наблюдения за состоянием системы, блок обработки данных от датчиков и блок формирования команд. В задачи оператора входят наблюдение за состоянием системы, выбор и назначение команд управления. В данной системе управляющий центр формирует глобальную карту с использованием визуальной информации от камеры дрона и с учётом команд оператора формирует задания следующему уровню.

Логический уровень отвечает за изменение параметров движения группы роботов в среде с препятствиями и координацию их действий в зависимости от результата выполнения задания соответствующему уровню.

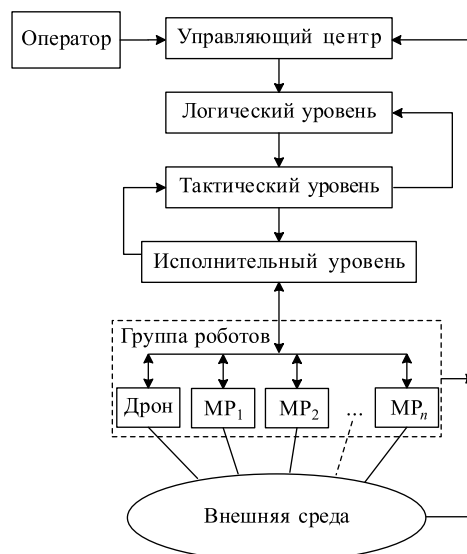


Рис. 2. Структура системы управления

ющим роботом. На этом уровне формируется конфигурация группы роботов с помощью теории перечисления Пойа [7], связанная с препятствиями на глобальной карте.

На тактическом уровне вырабатываются команды управления перестроением и движением группы с сохранением конфигурации.

На исполнительном уровне осуществляется управление механизмами на основе законов управления.

Логический уровень системы управления группой роботов. На логическом уровне обеспечивается движение группы роботов при возникновении препятствий с использованием аппарата конечных автоматов. Эта стратегия предложена в работе [8], связанной с исследованием управляющего автомата для управления поведением группы мобильных роботов. Система управления группой роботов становится двухуровневой: нижний уровень — логическое управление отдельным роботом — обеспечивает управление движением робота в различных режимах, связанных с законом управления на тактическом уровне, а верхний — групповой координатор — выбирает режим движения группы роботов в зависимости от команды управляющего центра, результата выполнения задания соответствующим роботом и посылает команды на нижний уровень.

Модель мобильного робота. В нашей задаче робот включает следующие компоненты: механическую платформу, имеющую два независимых ведущих колеса и одно пассивное, два электродвигателя с магнитными энкодерами, одноплатный компьютер Raspberry Pi 2B, микроконтроллер Arduino Uno для управления двигателями, Wi-Fi-адаптер ASUS, обеспечивающий высокую скорость обмена данными, и драйвер двигателя L298N, состоящий из двух H-мостов.

Модель конечного автомата каждого робота имеет следующие состояния: неподвижное (x_0), движение с сохранением конфигурации (x_1), движение при перестроении (x_2). Тогда модель робота имеет вид: $A = (U_A, X_A, Z_A, f, h)$, где множество входных сигналов $U_A = \{\text{pause}(u_0), \text{movement}(u_1), \text{transform}(u_2)\}$ — 0, 1, 2 — индексы; множество состояний $X_A = \{x_0, x_1, x_2\}$; множество входных сигналов $Z_A = \{\text{success}_p(z_1), \text{success}_m(z_2)\}$. Соответствующая диаграмма Мура представлена на рис. 3.

При получении команды « $\text{pause}(u_0)$ » робот должен остановиться и ждать следующую команду. Одновременно он посылает групповому координатору сигнал « $\text{success}_p(z_1)$ ». Когда

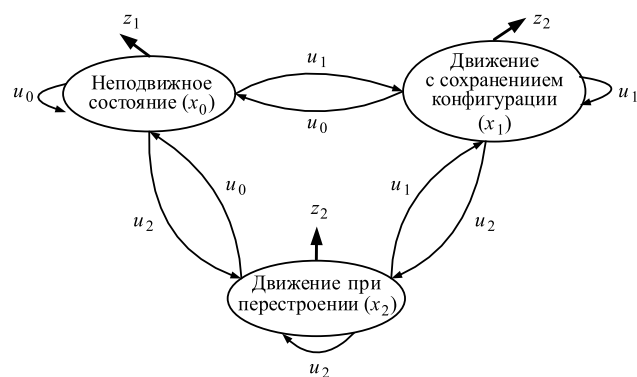


Рис. 3. Диаграмма автомата отдельного робота

робот получает команду « $\text{movement}(u_1)$ », он начинает исполнять закон управления, обеспечивающий сохранение конфигурации при движении группы. Робот посылает групповому координатору сигнал « $\text{success}_m(z_2)$ », двигаясь в целевую точку. При получении команды « $\text{transform}(u_2)$ » робот начинает выполнять задачу перестроения. Когда робот двигается в целевую точку новой конфигурации группы, он посылает групповому координатору сигнал « $\text{success}_m(z_2)$ ».

Таким образом, выходная информация для группового координатора — команды от оператора, а также сигналы от мобильных роботов, объединённых в группу. В ответ координатор вырабатывает соответствующие команды роботам группы.

Групповой координатор. Схема логического уровня системы управления группой роботов представлена на рис. 4. Задача координатора —

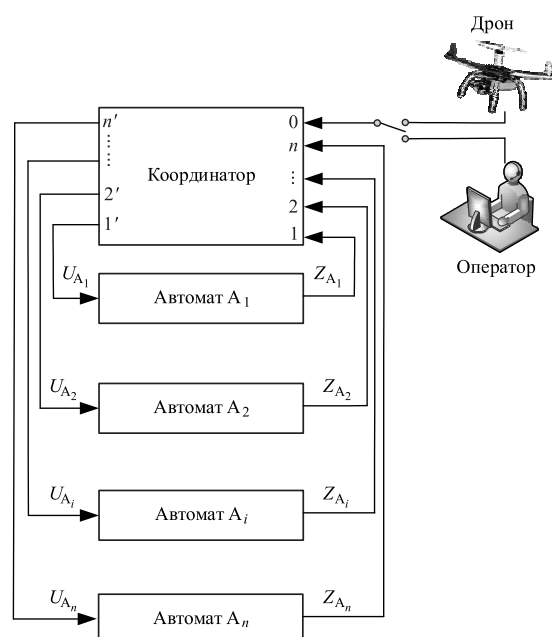


Рис. 4. Схема логического уровня системы управления движением группы роботов

обеспечить смену состояний управляемого движения группы роботов. Поэтому координатор, получив команду от дрона или оператора, посылает команду изменения состояния группы и координирует действия роботов с учётом их сигналов о результатах выполнения задания. Наша задача — построить модель координатора, обеспечивающего согласованное движение роботов с сохранением конфигурации группы или перестроением роботов для формирования новой конфигурации.

Реализация этой задачи предполагает, что группа роботов может быть в одном из четырёх состояний: состояние x_0 — начальное, в этот момент каждый робот находится в неподвижном состоянии; состояние x_1 — сохранение конфигурации, в этом состоянии реализуется согласованное управление движением роботов в группе; состояние x_2 — перестроение, здесь происходит управление движением роботов для изменения структуры группы; состояние x_3 — остановка, когда каждый робот стоит или прекращает движение. Диаграмма состояний автомата-координатора представлена на рис. 5.

Множество входных команд: z_{a0} — wait, z_{a1} — movement, z_{a2} — transformation, z_{a3} — pause_p, z_{a4} — success_m, z_{a5} — success_p.

Множество выходных команд: u_0 — pause, u_1 — movement, u_2 — transform.

Планирование и координация поведения. Процесс работы координатора группы роботов в каждом состоянии автомата выглядит следующим образом.

При поступлении команды «wait(z_{a0})» каждому роботу координатор посылает команду «pause(u_0)» (в это время группа роботов находится в неподвижном состоянии). После получения сигнала «movement(z_{a1})» или «success_m(z_{a4})» координатор посылает команду «movement(u_1)» группе роботов. При получе-

нии команды «movement(z_{a1})» робот должен исполнять закон управления, обеспечивающий его движение с сохранением конфигурации в заданной окрестности. При появлении команды «transformation(z_{a2})» координатор посылает роботу команду «transform(u_2)». По команде «transform(u_2)» группа должна изменить топологию, выбранную из множества структур формации с соответствующей формой препятствия в окружающей среде. Когда поступает команда «pause_p(z_{a3})» или «success_p(z_{a5})» координатор посылает соответствующим роботам команду «pause(u_0)». При появлении сигнала «pause(u_0)» группа прекращает движение.

Тактический уровень системы управления движением группы роботов. Суть тактического уровня состоит в разработке подхода к управлению движением группы роботов в двух режимах: режим перестроения (для изменения топологии группа роботов должна двигаться без столкновения из текущего в целевое положение) и режим движения с сохранением конфигурации (робот выполняет основной закон управления — двигаться для сохранения текущей конфигурации, например, клин, сетка, цепочка и т. д.).

Режим перестроения. С помощью методов, изложенных в статье [9], все роботы знают начальные и целевые положения остальных роботов и, следовательно, их планируемые положения, а также стратегию избегания столкновения. В связи с этим закон управления для каждого робота состоит в способе выбора относительных расстояний и ориентации. Окончательно данный закон управления можно записать в виде

$$\begin{cases} v_i = k_{vi}l_i; \\ \omega_i = k_{\omega i}(\alpha_i - \theta_i), \end{cases} \quad (2)$$

где $l_i = \|r_i - r_i^*\|^2$; $\alpha_i = \arctan(r_i, r_i^*)$; r_i, θ_i — положение и ориентация робота в текущий момент времени; $k_{vi}, k_{\omega i}$ — параметры.

Режим движения с сохранением конфигурации. Из-за существования различных препятствий перестроение может быть разным, поэтому в данном случае группа роботов, возможно, сохранит различную геометрическую топологию. Тогда задача состоит в том, чтобы сформировать закон управления движением группы роботов в строю любого типа. Для решения этой задачи используется модель Рейнольдса, но правила Рейнольдса часто применяются в случае

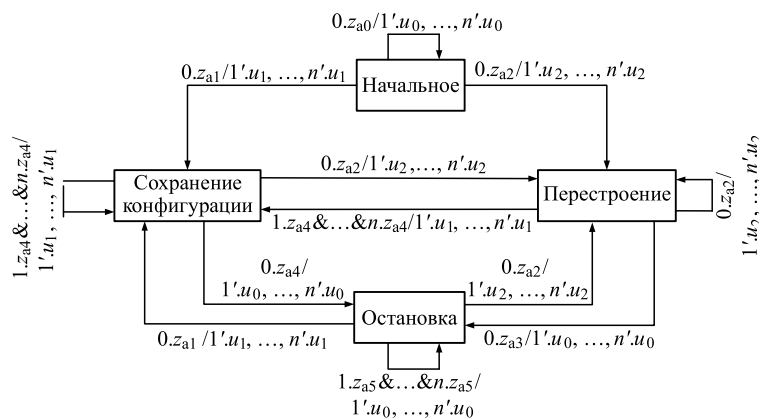


Рис. 5. Диаграмма координатора

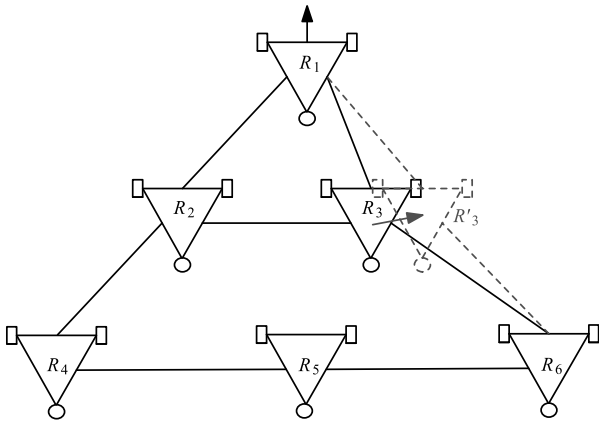


Рис. 6. Управляющее воздействие на робота при отклонении от заданного направления

роевого поведения, поэтому необходимо модифицировать алгоритм Рейнольдса. Исходя из этого, в работе [10] для обеспечения строевого движения добавилось четвёртое правило «Формация». Когда некоторый робот в группе отклоняется от заданного направления, возникают управляющие сигналы, возвращающие его в исходное положение, сохраняя текущую формацию (рис. 6). Кроме того, правила Рейнольдса имеют следующие виды: разделение — каждый робот, реализованный в модели, должен стремиться избежать столкновений с другими роботами группы; выравнивание скоростей — каждый робот группы должен двигаться в одном направлении с модулями, находящимися неподалеку от робота; сплочённость — роботы должны стремиться двигаться к центру масс группы. Рассмотрим задачу управления движением группы роботов в строю с помощью правил Рейнольдса, в соответствии с которыми каждый робот в группе может регулировать скорость движения. Будем считать, что между роботами связь

не прекращается, т. е. робот всегда получает информацию о позиции других роботов.

Тогда на тактическом уровне системы формируется закон управления строевым движением группы роботов с использованием трёх правил Рейнольдса: разделение, выравнивание и формации без сплочённости по следующим уравнениям:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i = k_v \mathbf{v}_{ci} + k_c \sum_{|r_{ij}| < d} \left\{ -\frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} (d - |\mathbf{r}_{ij}|) \right\} + k_\varepsilon \varepsilon_{pi}; \\ \omega_i = k_\omega \varepsilon_{\phi i}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{v}_i = \begin{pmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{pmatrix}$; $k_v, k_c, k_\varepsilon, k_\omega$ — параметры;

$\mathbf{v}_{ci} = \begin{pmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \end{pmatrix}$ — скорость центра масс группы роботов в системе координат i -го робота; $\mathbf{r}_{ij} = \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{pmatrix}$ —

положение i -го робота относительно j -го робота; d — безопасное расстояние между роботами; ε_{pi} — ошибка текущего положения i -го робота относительно заданного; $\varepsilon_{\phi i}$ — ошибка текущей ориентации i -го робота относительно заданной.

Компьютерное моделирование. Для проверки правильности и работоспособности предложенного подхода в среде ROS было проведено моделирование движения шести роботов. На основе известных препятствий в окружающей среде было использовано четыре вида структуры, а также проведено моделирование работы.

Для решения этой задачи разработана структурная схема моделирования (рис. 7), которая содержит: 1 — интерфейс оператора и строя или интеллектуальный уровень, здесь оператор посылает команды /oper_msg, включены команды «start» и «stop» (изменение состояния U); 2 — логический уровень, где имеется заранее подготовленная структура

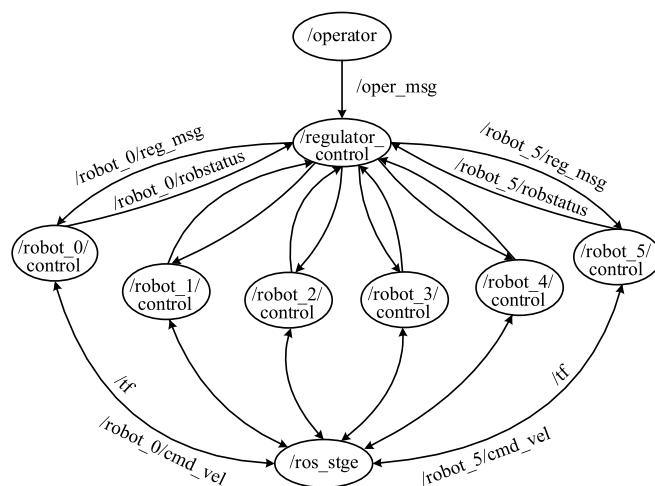


Рис. 7. Структурная схема моделирования

формации, а задача состоит в том, чтобы по команде верхнего уровня изменить состояние автомата и послать команды Z и координаты целевых точек на нижний уровень; 3 — тактический уровень, выходами которого являются сигналы управления движением роботов на основе соответствующего закона управления, а также команды исполнительного состояния на высший уровень (в процессе моделирования закон управления заключается в применении способа выражений (2) и (3) при перестроении и движении по строевой формации); 4 — модель внешней среды и роботов (исполнительный уровень).

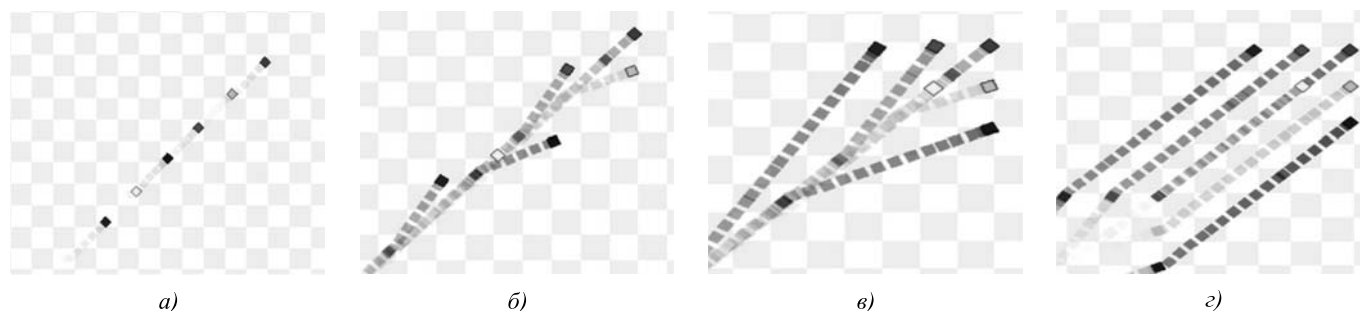


Рис. 8. Результаты моделирования:

а — начальное состояние; б, в — перестроение; з — движение группы с сохранением конфигурации

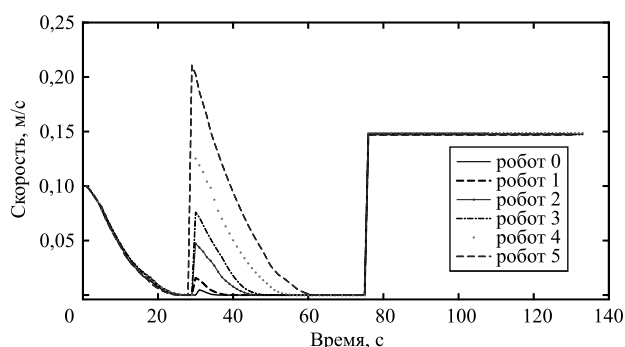


Рис. 9. Результаты скорости движения группы роботов

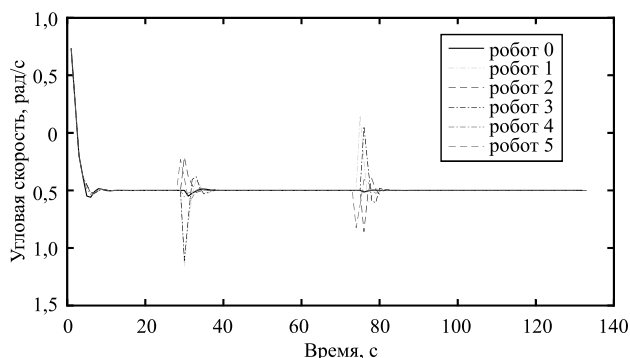


Рис. 10. Результаты угловой скорости движения группы роботов

На рис. 8 показаны результаты моделирования логического управления движением группы роботов, на рис. 9 — результаты скорости движения группы роботов, а на рис. 10 — результаты угловой скорости движения группы роботов.

Выводы. В данной статье представлены результаты управления движением группы мобильных роботов в среде с препятствиями. Исследован метод планирования и координации поведения для обеспечения смены состояний движения группы роботов. На тактическом уровне проведено формирование закона управления движением в двух режимах: режим перестроения и режим движения с сохранением конфигурации. Результаты компьютерного моделирования продемонстрировали эффективность предложенного подхода.

Библиографические ссылки

1. Levi P., Muscholl M., Bräunl Th. Cooperative Mobile Robots Stuttgart: Architecture and Tasks / Proceeding of the 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems. 1995. P. 310—317.
2. Desai J.P. A Graph Theoretic Approach for Modeling Mobile Robot Team Formations // Journal of Robotic Systems. 2002. Vol. 19. No.11. P. 511—525.
3. Chen J., Sun D., Yang J., Chen H. Leader—Follower Formation Control of Multiple Non-holonomic Mobile Robots Incorporating a Receding-horizon Scheme // The International Journal of Robotics Research. 2010. Vol. 29. No. 6. P. 727—747.
4. Leonard N.E., Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups / Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL, USA. 2001. P. 2968—2973.
5. Gu D., Hu H. Using Fuzzy Logic to Design Separation Function in Flocking Algorithms // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2008. Vol. 16. No. 4. P. 826—838.
6. Зенкевич С.Л., Назарова А.В., Хо Ц. Управление группой мобильных роботов с помощью сопровождающего дрона // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Т. 7. № 3. С. 208—214.
7. Иванов Б.Н. Дискретная математика. Алгоритмы и программы: учеб. пособие. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 288 с.
8. Zenkevich S.L., Nazarova A.V., Zhu H. Logical Control a Group of Mobile Robots / Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) Smart electromechanical systems. Studies in systems, decision and control. Springer, 2019. Vol. 174. P. 32—43.
9. Zenkevich S.L., Nazarova A.V., Huo J. Dynamic Switching of Multi-agent Formation in Unknown Obstacle Environment / Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) Smart electromechanical systems. Studies in systems, decision and control, Springer, 2020. Vol. 261. P. 73—87.
10. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 11. С. 774—782.

Ссылка для цитирования

Зенкевич С.Л., Назарова А.В., Хо Ц. Логическое управление движением группы мобильных роботов в среде с препятствиями // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 470—475.

УДК 519.977.58

Ф. Даяеф(Санкт-Петербургский политехнический университет,
Институт машиностроения, материалов и транспорта),**А.Н. Тимофеев**, д-р техн. наук, проф.(Санкт-Петербургский политехнический университет, Институт машиностроения,
материалов и транспорта, Высшая школа автоматизации и робототехники)

fdayeef@bk.ru

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Описан новый подход к выполнению визуального анализа видеопотока для исследования динамической среды при навигации мобильного робота, который движется по заданной траектории. Представлена модель нечёткой логики управления мобильным роботом с учётом скорости и положения других объектов. Установлены функции камеры RGB-D при контроле окружающей среды, определении расстояния до объекта, а также скорости движения объектов относительно робота.

Возможность применения предложенного метода подтверждается результатами моделирования работы мобильного робота в виртуальной среде Gazebo с использованием промежуточного программного обеспечения ROS.

Проведённое компьютерное моделирование обуславливает возможность идентификации динамических и статических объектов в неструктурированной динамической среде в зависимости от места нахождения робота.

Ключевые слова: мобильный робот; нечёткая логика; динамическая среда; навигация; компьютерное моделирование; обнаружение объектов.

A new approach to performing visual analysis of a video stream for studying a dynamic environment during navigation of a mobile robot moving along a given trajectory is described. A model of the mobile robot control fuzzy logic, taking into account the speed and position of other objects is introduced. The functions of the RGB-D camera for monitoring the environment, determining the distance to the object, as well as the speed of movement of objects relative to the robot are established.

The possibility of using the proposed method is confirmed by the results of simulating the operation of a mobile robot in a virtual Gazebo environment using the intermediate ROS software.

The carried out computer modeling makes it possible to identify dynamic and static objects in an unstructured dynamic environment, depending on the location of the robot.

Keywords: mobile robot; fuzzy logic; dynamic environment; navigation; computer simulation; objects detection.

Введение. В условиях роста научно-технического прогресса, развития цифровых технологий мобильные роботы не только становятся неотъемлемой составляющей производственных процессов, но и позволяют решать проблемы в логистике склада, торговле, сервисе, медицине, образовании и др. Рост потребностей отечественных предприятий в мобильных роботах обуславливает необходимость выбора современных интеллектуальных методов и технологий управления. Одним из возможных вариантов управления является создание динамической среды для навигации работы мобильных роботов, решающих различные прикладные задачи. Создание динамической среды исключит недостатки статических методов управления, в которых невозможно оценить динамику перемещения стационарных объектов.

В статье поставлена математическая задача контроля окружающей среды в произ-

водственных помещениях склада, проанализированы существующие методы и средства контроля. Выбран наиболее эффективный вариант решения задачи, учитывающий особенности, специфику, технические условия работы мобильного робота. Далее рассмотрена модель управления роботом с помощью контроллера с нечёткой логикой и определены её параметры. Проведены экспериментальные исследования с применением алгоритма Мамдани, реализованного в модуле Sickest-Fuzzy на языке программирования Python. Подведены итоги и обоснованы полученные результаты управления мобильным роботом в динамической среде с помощью нечёткой логики.

Постановка задачи. Предположим, на складе работает мобильный робот, который движется по заданной траектории. Среда склада включает набор стационарных объектов: стены, колонны, стулья, хранимые материалы и

т. п. В той же плоскости, где размещены стационарные объекты, реализует поставленные задачи мобильный робот. Движение робота происходит по заданной траектории со скоростью, не превышающей заданные ограничения. Сначала рассмотрим случай перемещения стационарных объектов к целевой точке заданной траектории. В данном случае необходимо минимизировать время и установить скорость движения мобильного робота при изменении параметров окружающей среды, в том числе при появлении новых статических и динамических объектов.

Для предотвращения столкновения непредвиденный стационарный объект должен быть обнаружен на расстоянии, превышающем путь торможения S_r мобильного робота с начальной штатной (разрешённой) скоростью V_r до полной остановки при максимально достижимом ускорении A_r торможения:

$$S_r = \frac{V_r^2}{2(-A_r)}. \quad (1)$$

В динамической среде необходимо идентифицировать объекты, движущиеся с максимальной скоростью V_0 , на расстоянии более

$$S_n = S_r + V_0 T_t, \quad (2)$$

где $T_t = \frac{V_r}{-A_r}$ — длительность торможения.

Если допустимое ускорение мобильного робота $A_r = \pm 0,3 \text{ м/с}^2$ и максимальная скорость объекта $V_0 = 1,5 \text{ м/с}$, то безопасное расстояние до обнаруживаемого объекта рассчитывается по формуле

$$S_n = 1,6V_r^2 + 5V_r.$$

Для мобильного робота, движущегося с начальной скоростью $V_r = 1,5 \text{ м/с}$, необходимо определить динамический объект на расстоянии $S_n = \sim 11,3 \text{ м}$.

Анализ существующих решений для аналогичных условий показал, что лучшим вариантом является лидар (обнаружение и определение дальности). Однако для небольших транспортных систем его нецелесообразно применять из-за высокой цены. Например, в работе [1] описан метод определения параметров динамических объектов при цене лидара около 10 тыс. долл. Другим способом решения рассматриваемой проблемы является применение методов компьютерного моделирования.

В табл. 1 приведены основные методы идентификации динамических объектов, их преимущества и недостатки.

В данной работе представлен новый метод обнаружения и отслеживания динамических объектов.

Обнаружение и отслеживание объектов.

Матрица для преобразования координат из системы координат робота $[X_c \ Y_c \ Z_c]$ в систему координат камеры (пиксели изображения) $[X_{img} \ Y_{img}]$ задаётся следующим образом:

$$\begin{bmatrix} X_{img} \\ Y_{img} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F}{Z_c}(X_c) + w/2 \\ \frac{F}{Z_c}(Y_c) + h/2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где F , w , h — параметры камеры (фокусное расстояние, высота и ширина датчика).

Матрица создана для преобразования прямого отрезка из системы координат робота в камеру (изображение). Если предположить, что координата Z соответствует «глубине», расстоянию от камеры до точки, то это можно описать уравнением

$$L_t^2 = \frac{(FLx)^2 + (FLy)^2}{Z_{tc}^2}. \quad (4)$$

Таблица 1

Методы идентификации динамических объектов [2]

Метод	Преимущества	Недостатки
Фоновое моделирование [3, 4]	Простота проведения исследований; возможность проведения исследований в режиме реального времени; высокое качество идентификации объектов	Не подходит для свободного движения камеры; точность определяется параметрами фоновой модели
Классификация траекторий [5, 6]	Обеспечение хорошей траектории объекта; умеренная сложность	Высокая чувствительность к шуму; не предоставляет информацию о параметрах объекта; точность определяется выбранным режимом отслеживания движения объекта
Отслеживание объектов [7, 8]	Высокая производительность обработки данных при движении камеры; простота проведения исследований	Не предоставляет информацию о параметрах объекта; необходимо знать координаты для выбора объекта

Изменение длины между двумя кадрами ($\text{frame}_t, \text{frame}_{t+1}$):

$$\frac{L_t^2}{L_{t+1}^2} = \frac{\frac{(FLx)^2 + (FLy)^2}{Z_{tc}^2}}{\frac{(FLx)^2 + (FLy)^2}{Z_{t+c}^2}} = \frac{Z_{t+c}^2}{Z_{tc}^2}. \quad (5)$$

Следовательно, если можно рассчитать «глубину» объекта (прямого отрезка), то можно определить и скорость объекта между двумя кадрами с помощью камеры RGB-D.

На первоначальном этапе выполним идентификацию динамических объектов по исходным выбранным фрагментам в такой последовательности:

1) инициализация выделенных фрагментов: фрагмент будет определяться выделением границ на изображении с применением оператора Кэнни [9]. В результате обработки данных по алгоритму Кэнни получено чёрно-белое изображение, в котором белые пиксели образуют границы или рёбра динамического объекта. Применяется фильтр по длине и «глубине» найденного фрагмента объекта;

2) поиск выделенных фрагментов в следующем кадре: на этом шаге найденные выделенные фрагменты преобразуются в контур. Для этого используются два принципа: преобразование Хафа (Hough transforms) — нахождение несовершенных экземпляров объектов в определённом классе фигур (отрезков) и использование двух концов контуров в качестве двух концов отрезка. В результате образуются две точки, которые будут новыми выделенными фрагментами для отслеживания параметров объекта между двумя кадрами с использованием алгоритма оптического потока, основанного на алгоритме Лукаса — Канады;

3) расчёт изменения положения и длины каждого показанного фрагмента между двумя кадрами. В работе [10] рекомендуется учитывать погрешность в зависимости от модели камеры Kinect (RGB-D), поскольку неопределённость измерения пропорциональна квадрату значения «глубины» $\sigma_z = \frac{1}{f} \sigma_d d^2$.

Определить изменение «глубины» между кадрами на основании сравнения данных, полученных в результате работы камеры RGB-D, невозможно, но решить данную проблему можно с помощью уравнения (5) для поиска скорости объекта:

$$\frac{L_t^2}{L_{t+1}^2} = \frac{Z_{t+c}^2}{Z_{tc}^2}. \quad (6)$$

Проекция скорости объекта V_{ox} относительно системы координат мобильного робота рассчитывается по формулам

$$\Delta S_{yr} = \frac{X_{ct}}{X_{ct}} = \frac{X_{imgt-\frac{\omega}{2}} Z_{ct}}{X_{imgt+1-\frac{\omega}{2}} Z_{ct+1}}; \quad (7)$$

$$V_{ox} = \frac{\Delta S_{yr}}{t}.$$

Конструкция контроллера Fuzzy Logic (FLC).

При построении базовой структуры контроллера с нечёткой логикой Fuzzy Logic (FLC) применяют методы фаззификации, логического вывода и дефаззификации.

На первоначальном этапе при построении контроллера с нечёткой логикой реализуем метод фаззификации, который предусматривает определение по отдельной входной переменной функции принадлежности определяющего её термина входной лингвистической переменной. Вторая часть — это нечёткий вывод, который объединяет факты, полученные в результате нечёткого управления.

Когда входные и выходные переменные, а также функция принадлежности определены, то нечёткое правило можно представить как правило IF THEN.

При выполнении фаззификации контроллером с нечёткой логикой Fuzzy Logic (FLC) на основании данных о расстоянии, об угле и их изменении формируется переменная, позволяющая определить максимальную скорость движения робота. Для определения переменной скорости в интервале от 0 до 1,5 м/с контроллер использует сигмоидальные и гауссовские функции принадлежности с выделением градаций: очень низкая (very low — VL), низкая (low — L), средняя (medium — M), высокая (high — H) и очень высокая (very high — VH), как показано на рис. 1.

Перемещение объекта производится в установленных параметрах длины траекто-

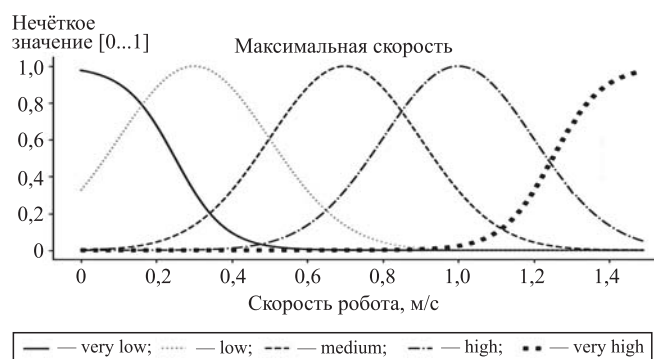


Рис. 1. Функции принадлежности максимальной скорости мобильного робота

рии от 0 до 12 м, а его параметры настраиваются по трём функциям принадлежности: большая (big — B), средняя (medium — M), малая (small — S). Границы удалённости объекта от робота [min -0,06...+0,06 м] определяются по функциям принадлежности: увеличение (decrease — D), уменьшение (increase — I) и отсутствие изменений (no change — N), как показано на рис. 2.

Абсолютное значение углового объекта с направлением мобильного робота должно находиться в пределах от 0 до 1,5 рад, а его параметры определяются по трём функциям принадлежности: большая (big — B), средняя (medium — M), малая (small — S). Границы изменения параметров углового объекта [min -0,06...+0,06 рад] определяются по функциям принадлежности: увеличение (decrease — D), уменьшение (increase — I) и отсутствие изменений (no change — N), как показано на рис. 3.

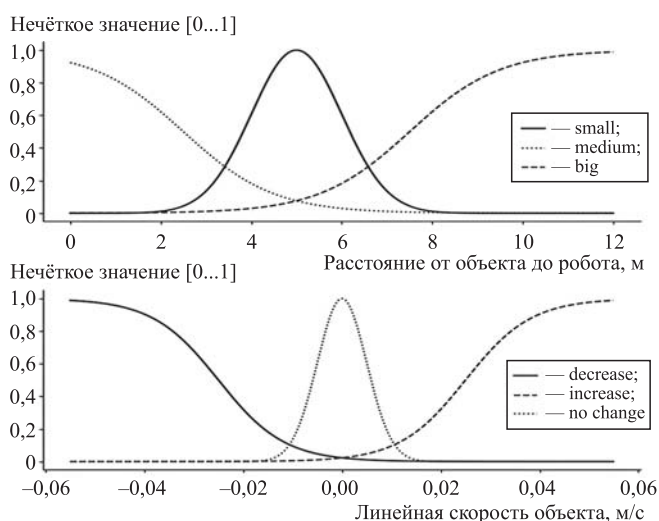


Рис. 2. Функции принадлежности удалённости объекта от мобильного робота

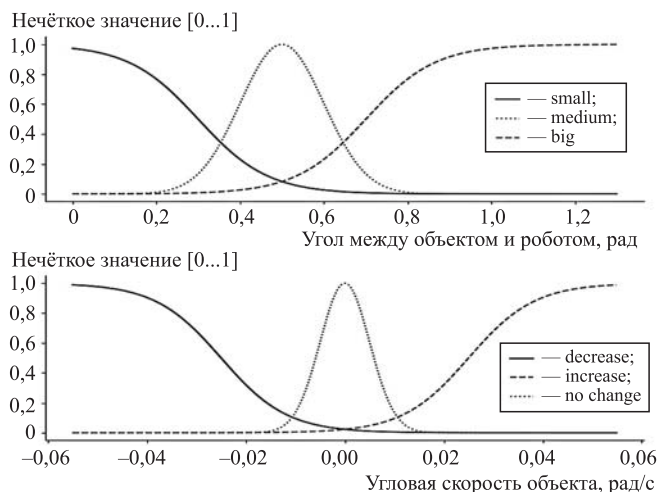


Рис. 3. Функции принадлежности углового объекта с направлением мобильного робота

После подробного описания функций принадлежности определим принципы использования алгоритма Мамдани в системах нечёткого вывода. Исходными данными выступают такие параметры, как расстояние (distance), начальная скорость (speed V_z), угол (angle), конечная скорость (speed V_x), выходная скорость (output speed) и вес значимости фактора (weight). Для каждого из параметров выбраны соответствующие функции принадлежности (табл. 2).

В методе дефазификации центра тяжести (COG) используется переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной, ограниченной левой и правой точками объекта нечёткого множества, и функция принадлежности. Общая площадь распределения функции принадлежности, используемая для представления комбинированного управляющего действия, разделена на несколько подобластей. После расчёта площадей каждой подобласти производится их суммирование и тем самым определяются параметры дискретного нечёткого множества.

Экспериментальные результаты. При проведении экспериментальных исследований использовался алгоритм Мамдани, реализованный в модуле Sickest-Fuzzy на языке программирования Python. На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования при заданных ограничениях скорости и угла.

Таблица 2

Нечёткие правила

Расстояние (distance)	Начальная скорость (speed V_z)	Угол (angle)	Конечная скорость (speed V_x)	Выходная скорость (output speed)	Вес значимости фактора (weight)
S	N	S	P	L	0,7
S	N	M	P	M	0,6
S	N	B	P	H	0,5
S	P	S	P	L	0,9
S	P	M	P	M	0,8
S	P	B	P	H	0,7
S	N	S	M	VL	0,9
S	N	M	M	L	0,8
S	N	B	M	M	0,7
S	M	S	N	VL	0,8
S	M	M	N	L	0,7
S	M	B	N	M	0,6

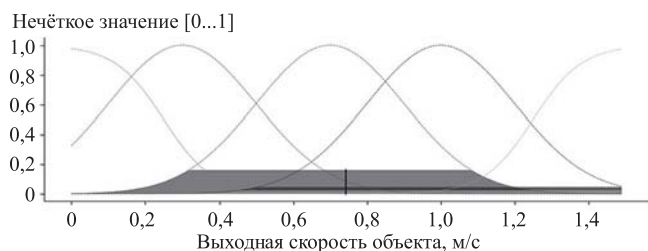


Рис. 4. Дефаззификации центра тяжести для выходной скорости (0,74 рад/с) при входе ($Z = 3$ м, $\text{angle} = 0,1$ рад, $V_{\text{ox}} = +0,02$ рад, $V_{\text{oz}} = +0,1$ м/с)

Результаты показали, что при заданных параметрах скорости и угла максимальная скорость движения наблюдается, когда объект приближается к роботу.

Заключение. Анализ среды работы мобильного робота позволил установить параметры обнаружения объектов для исключения столкновений. Для решения проблемы определения изменения «глубины» между кадрами на основании сравнения данных, полученных в результате работы камер RGB-D, было предложено построить базовую структуру контроллера с нечёткой логикой Fuzzy Logic (FLC) с применением методов фаззификации, логического вывода и дефаззификации.

Результаты проведения моделирования работы мобильного робота в виртуальной среде Gazebo с использованием промежуточного программного обеспечения ROS показали, что выбранные методы позволяют идентифицировать объекты при удалённости объекта от мобильного робота и с направлением на него.

При проведении экспериментальных исследований использовался алгоритм Мамдани, реализованный в модуле Sickest-Fuzzy на языке программирования Python. Полученные результаты указывают на возможность управления мобильным роботом в динамической среде с помощью нечёткой логики.

Библиографические ссылки

1. Gerasimov V.N. A method for determining the parameters of dynamic obstacles based on laser rangefinder data // 21st century: fundamental science and technology: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. M., 2014. Vol. 3. P. 155—157.
2. Yazdi M., Bouwmans T. New trends on moving object detection in video images captured by a moving camera: A survey // Computer Science Review. 2018. Vol. 28. P. 157—177.
3. Wu Y., He X., Nguyen T.Q. Moving object detection with a freely moving camera via background motion subtraction // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2017. Vol. 27 (2). P. 236—248.
4. Gong L., Yu M., Gordon T. Online codebook modelling based background subtraction with a moving camera / 3rd International Conference on Frontiers of Signal Processing, ICFSP, 2017. P. 136—140.
5. Singh S., Arora C., Jawahar C.V. Trajectory aligned features for first person action recognition // Pattern Recognit. 2017. Vol. 62. P. 45—55.
6. Sheikh Y., Javed O., Kanade T. Background subtraction for freely moving cameras / IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV, 2009. P. 1219—1225.
7. Bagherzadeh M.A., Yazdi M. Regularized least-square object tracking based on l2,1 minimization / 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, ICROM, 2015. P. 535—539.
8. Chen J., Sheng H., Zhang Y., Xiong Z. Enhancing detection model for multiple hypothesis tracking / Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2017. P. 2143—2152.
9. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8(6). P. 679—698.
10. Khoshelham K., Elberink S.O. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications // Sensors. 2012. Vol. 12. P. 1437—1454.

Ссылка для цитирования

Дасеф Ф., Тимофеев А.Н. Управление мобильным роботом в динамической среде с помощью нечёткой логики // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 476—480.

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 03.08.2020.

Подписано в печать 21.09.2020.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

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

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

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