Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

11
2019

Главный редактор

Микрин Е.А. – д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

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
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 технологии (КНР)
Чистякова Т.Б. – д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
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 Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Тимофеев Б.П., Данг Н.Т. Автоматизация процесса сборки зубчатых передач 483

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Григорьев-Фридман С.Н. Датчик панорамного обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве «Ладога-1М» 488

Васильков Ю.В., Камакин А.Н., Сергеев И.А., Фролов П.А. Анализ методов выделения тренда 499

Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Формирование кривой разгона объекта управления по импульсной динамической характеристике 505

Чернышев А.Б., Назарцев М.С., Майрансаев З.Р. Анализ автоколебаний систем с распределёнными параметрами . . 510

Назаренко М.А. Организация менеджмента качества мобильных операционных систем 514

Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Бактерицидный рециркулятор 518

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ху Ц., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Моделирование алгоритмов оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем по данным лабораторного эксперимента 524

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 11 / 2019

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

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

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Timofeev B.P., Dang N.T. Automation of gears assembly 483

MODERN TECHNOLOGIES

Grigorev-Fridman S.N. Sensor for the target panoramic detection and destruction of the enemy by using a modulated laser beam pointing in 3D-space «Ladoga-1M» 488

Vasilkov Yu.V., Kamakin A.N., Sergeev I.A., Frolov P.A. Analysis of trend selection methods 499

Bilfeld N.V., Volodina Yu.I. The formation of the acceleration curve for the control object on the pulse dynamic characteristic 505

Chernyshev A.B., Nazartsev M.S., Mayransaev Z.R. Analysis of systems self-oscillations with distributed parameters 510

Nazarenko M.A. Organization of quality management for mobile operating systems 514

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Dyukin A.A. Bactericidal recirculator 518

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Khu Ts., Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Selezneva M.S. Modeling of algorithms for estimating errors of inertial navigation systems according to a laboratory experiment data are 524

© «Innovative Mashinostroenie» Publishers,
«Automation. Modern technologies», 2019

УДК 621.833

Б.П. Тимофеев, д-р техн. наук, проф., **Н.Т. Данг**
(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики — Университет ИТМО)
thongdragon.vn@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБОРКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Рассмотрены особенности расчёта кинематической погрешности цилиндрических зубчатых передач и способы его автоматизации. Предложена методика расчёта и минимизации кинематической погрешности передач с кратными и некратными передаточными числами. Даны оценки кинематической погрешности и рекомендации для их минимизации при сборке передач.

Ключевые слова: автоматизация; сборка зубчатых передач; кинематическая погрешность; эффект выставки; минимизация; начальные фазы; степень точности; составляющие гармоники.

The features of calculating the kinematic error of cylindrical gears and methods for its automation are considered. A methodology for calculating and minimizing the kinematic error of gears with multiple and aliquant gear ratios is proposed. Estimates of the kinematic error and recommendations for their minimization at the gears assembly are given.

Keywords: automation; gear assembly; kinematic error; exhibition effect; minimization; initial phases; degree of accuracy; harmonics components.

Введение. Точность зубчатой передачи во многом зависит не только от погрешностей её составных элементов, но и от процесса монтажа колёс в сборочный узел. Практика показала, что правильный подход к сборке зубчатых колёс может обеспечить компенсацию циклических составляющих погрешностей передачи, что повышает её точность.

В процессе сборки передач, в особенности кинематических, зачастую пытаются опытным путём отыскать такое направление геометрических эксцентриситетов колёс, которое обеспечивало бы наибольшую лёгкость вращения. Такой подход не всегда приводит к наилучшему варианту сборки. Кроме того, для многозвенных зубчатых механизмов он может оказаться весьма трудоёмким.

Анализ тенденций развития машино- и приборостроения показал, что обеспечить требуемое качество выпускаемой продукции в современном многономенклатурном производстве невозможно без использования гибких систем автоматизированного контроля. В статье предлагается определять оптимальный процесс сборки колёс с помощью математических моделей зубчатой передачи. При этом автоматически обеспечивается выставка эксцентриситетов в процессе сборки при условии, что зуб, с которого начинается положительная ветвь первой гармоники кинематической погрешности колеса, помечен в процессе измерения параметров точности.

Параметры передачи варьируются в следующих диапазонах:

используются два ряда передаточных чисел u. В первом ряду $u = z_2/z_1 = 1; 2; ...; 10$ и всегда целое. Во втором ряду $z_2' = z_2 + 1$ или $z_2'' = z_2 - 1$, где z_2 имеет то же значение, что и в первом ряду, а $z_1 = 18$ во всех случаях;

модуль передачи $m = 1; 5; 10$ мм;

степень точности $k = 3...8$ (по ГОСТ 1643—81).

Расчёт кинематической погрешности проведён по данным ГОСТ 1643—81 [1]. Естественно, что значения циклических составляющих кинематической погрешности взяты по указанному стандарту.

Расчёт кинематической погрешности. Для обеспечения кинематической точности предусмотрены нормы, ограничивающие кинематическую погрешность передачи и кинематическую погрешность колеса.

Под кинематической погрешностью передачи понимают разность между действительным φ_3 и номинальным (расчётным) φ_2 углами поворота ведомого зубчатого колеса передачи, выраженную в линейных значениях длины дуги его делительной окружности (рис. 1). Величина кинематической погрешности контролируется допуском на *наибольшую кинематическую погрешность передачи* F'_{i0r} — наибольшую алгебраическую разность значений кинематической погрешности передачи за полный цикл из-

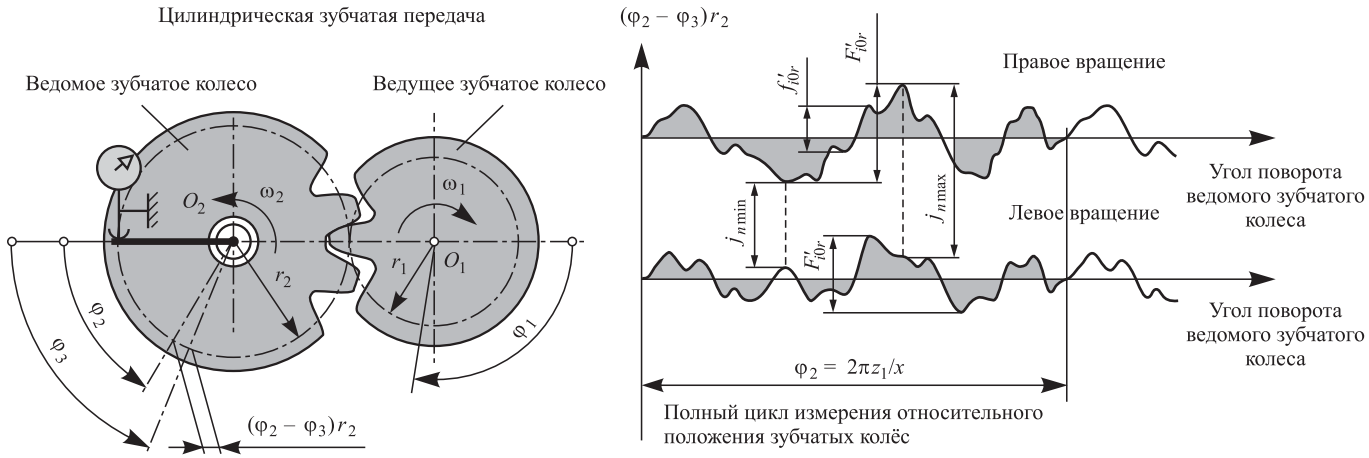

Рис. 1. Определение кинематических погрешностей передачи

менения относительного положения зубчатых колёс [2].

Полный цикл совершается в пределах числа оборотов большего зубчатого колеса и рассчитывается по формуле

$$\varphi_{T2} = 2\pi\frac{z_1}{x},$$

где φ_{T2} — полный цикл изменения относительного положения зубчатых колёс, выражаемый через угол поворота колеса; z_1 — число зубьев ведущего колеса; x — наибольший общий делитель чисел зубьев ведущего z_1 и ведомого z_2 зубчатых колёс.

Например, при $z_1 = 18$ и $z_2 = 45$ общий наибольший делитель $x = 9$, тогда

$$\varphi_{T2} = 2\pi\frac{18}{9} = 4\pi.$$

Наибольшая кинематическая погрешность передачи ограничена допуском F'_{i0}. Его значения в стандарте не приведены и определяются как сумма допусков на кинематическую погрешность колёс передачи, т. е.

$$F'_{i0} = F'_1 + F'_2,$$

где F'_i — допуск на кинематическую погрешность шестерни ($i = 1$) и колеса ($i = 2$).

В стандарте числовые значения F'_i не приведены, их рассчитывают по соотношению

$$F'_i = F_{pi} + f_{fi},$$

где F_{pi} — допуск на амплитуду первой гармоники накопленной погрешности шага, определяется по табл. 7 [1]; f_{fi} — погрешность профиля, определяется по табл. 8 [1].

Поскольку частоты F_{pi} оборотные [1], а частоты f_{fi} примем равными частотам входа зубьев в зацепление, т. е. многократно бóльшими частот F_{pi}, принимаем F'_i как сумму постоянного слагаемого f_{fi} и функции F_{pi} от угла поворота колёс φ_i (для шестерни $i = 1$, а для колеса $i = 2$).

Накопленная погрешность шага зубчатого колеса обусловлена в основном погрешностью обката и монтажного эксцентриситета e_m зубчатого колеса, который вызывает появление эксцентриситета e основной окружности колеса [3]. Если накопленная погрешность шага колеса является следствием только эксцентриситета основной окружности (идеализированный случай), то

$$F_p = \pm e\sin(\varphi \pm \varepsilon),$$

где φ — угол поворота зубчатого колеса; ε — фазовый угол.

На самом деле кинематическая погрешность передачи является сложным комплексом составляющих погрешностей: погрешности изготовления, монтажа, деформации под нагрузкой, погрешности различных элементов передачи и т. д. (рис. 2). В рамках данной работы кинематическую погрешность колёс F'_i аппроксимируем в виде некоторой циклической функции, амплитуды которой приняты равными допускаемым ГОСТом значениям.

Поскольку ставится ограниченная задача: минимизировать кинематическую погрешность передачи за счёт выставки геометрических эксцентриситетов колеса в процессе сборки, будем полагать:

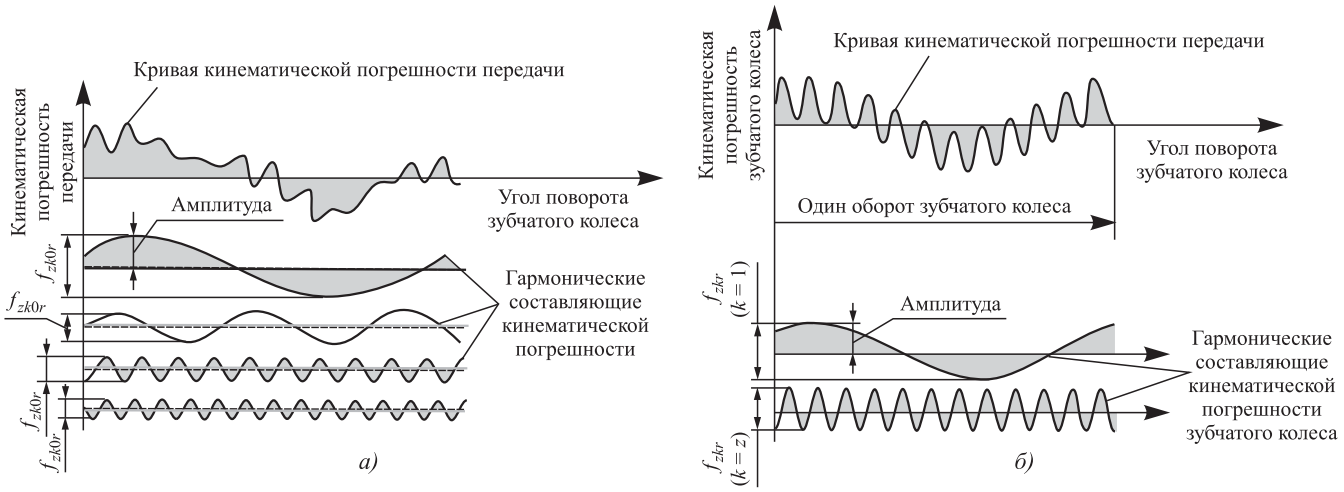

Рис. 2. Циклическая погрешность зубчатого колеса и передачи:
а — погрешность передачи; *б* — погрешность колеса; f_{zk0r} и f_{zkr} — гармонические составляющие кинематической погрешности передачи и колеса при разных значениях частоты k

$$F_1' = \frac{F_{p1}}{2}\sin(\varphi_1 + \varepsilon_1) + f_{f1};$$

$$F_2' = \frac{F_{p1}}{2}\sin\left(\frac{\varphi_1}{u} + \varepsilon_2\right) + f_{f2},$$

где ε_1, ε_2 — начальные фазы первой гармоники циклической погрешности оборотной частоты шестерни и колеса соответственно [4—8].

Не теряя общности, положим $\varepsilon_2 = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$. Тогда кинематическая погрешность передачи

$$F_{i0}' = \frac{F_{p1}}{2}\sin(\varphi_1 + \varepsilon) + \frac{F_{p2}}{2}\sin\left(\frac{\varphi_1}{u}\right) + f_{f1} + f_{f2}.$$

Следует отметить, что согласно данной формуле определяем только ту часть кинематической погрешности передачи, которую хотим минимизировать при сборке.

Методика расчёта. Суть расчёта заключается в определении разности начальных фаз ε колёс, при которой суммарная кинематическая погрешность передачи достигает минимума, т. е. размах функции кинематической погрешности передачи минимален. Иными словами, решение задачи заключается в подборе номера зубьев шестерни и колеса для монтажа в зацепление так, чтобы размах суммарной F_{i0}' был наименьшим среди всех возможных случаев монтажа, при условии, что кинематическая погрешность шестерни и колеса описывается гармонической функцией и на колесе и шестерне имеется маркированный зуб — условное начало первой гармоники.

При выбранном $\varepsilon_2 = 0$ задача ставится следующим образом: подобрать номер зуба шестерни для монтажа в зацепление с первым зубом колеса. Выбираем число зубьев шестерни: $z_1 = 18$. Тогда угловой шаг шестерни

$$p = \frac{360°}{z_1} = \frac{360°}{18} = 20°.$$

Так как число зубьев может быть только целым, разность начальных фаз ε может принимать только дискретные значения: $\varepsilon = 20n$, $n = 0, 1, 2, ..., 18$.

На практике такую задачу можно решать следующим образом. На шестерне выбирается некий зуб как начало отсчёта, и все зубья шестерни нумеруются. Аналогично на колесе выбирается некий зуб как начало отсчёта, и нумеруются все зубья колеса. Считается, что каждая комбинация номеров зубьев шестерни и колеса является одной позицией для сборки. Для каждой позиции проверяется кинематическая погрешность за полный цикл изменения относительного положения зубчатых колёс, т. е. ведомое колесо должно провернуться на такой угол, при котором первый зуб ведущего колеса вновь войдёт в контакт с первым зубом ведомого колеса. При дальнейшем вращении колёс характер вращения будет почти полностью повторяться [9—11]. Сравнение кинематических погрешностей всех позиций позволяет подобрать позицию выставки колёс с наименьшей погрешностью.

Если рассматриваемые передачи имеют некратные передаточные числа, то полный цикл относительного положения колёс будет боль-

шим, и процесс определения кинематической погрешности за полный цикл вращения колёс может оказаться трудоёмким. В данной работе предлагается методика расчёта, основанная на математическом моделировании передач. С помощью численных методов программной оболочки MathCad можно легко определить кинематическую погрешность передач любой сложности и с высокой точностью. Предлагаемая методика расчёта начальных фаз ε позволяет перед сборкой передачи выбрать оптимальный вариант сборки зубчатых колёс.

Результаты исследования. По рассмотренной методике проведены расчёты для следующих случаев:

передаточные числа кратные: $u = z_2/z_1 = 1; 2; ...; 10$ и некратные, где $z_2' = z_2 + 1$ или $z_2'' = z_2 - 1$, где z_2 имеет то же значение, что и при кратных u, а $z_1 = 18$ во всех случаях;

модуль передачи $m = 5$ мм;

число зубьев шестерни $z_1 = 18$, колеса $z_2 = uz_1$;

степень точности $k = 7$ [1].

Графики кинематической погрешности различных передач при изменении начальных фаз ε представлены на рис. 3—6.

Графики F_{i0}' можно разделить на три группы: для $u = 1; 5; 9$ (рис. 3), $u = 2; 4; 6; 8; 10$ (рис. 4), $u = 3; 7$ (рис. 5). Так как графики в одной и той же группе имеют похожую форму, различаются лишь величиной F_{i0}', для каждой группы представлен только один график.

При некратных u ($u = 0{,}94; 1{,}06...$) нет различия в максимальных F_{i0}' при изменении начальных фаз ε. Графики F_{i0}' при различных начальных фазах ε лишь сдвинуты относительно друг друга на некоторый угол поворота колеса φ (рис. 6). При этом на каждом участке полного цикла изменения относительного положения зубчатых колёс T ($T/2$ или $T/3$, $T/4$...) наблюдаются чёткие экстремумы зависимости F_{i0}' от начальных фаз ε (похожи на случаи при кратных u). Другими словами, при некратных u все локальные минимумы F_{i0}' одинаковые для всех ε, т. е. эффект выставки отсутствует.

Явление отсутствия эффекта выставки может быть объяснено тем, что при некратных передаточных числах положения экстремумов гармоник погрешностей шестерни и колеса мало сдвигаются относительно друг друга, тем более, что полный цикл изменения относительного положения зубчатых колёс T осуществляется за большое число оборотов. В итоге суммирование гармоник приводит к независимости кинематической погрешности F_{i0}' от начальных фаз ε (рис. 7).

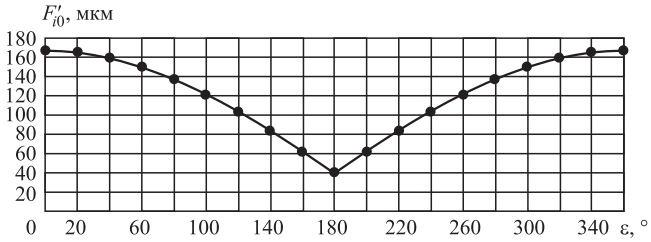

Рис. 3. Графики F_{i0}' для $u = 1$

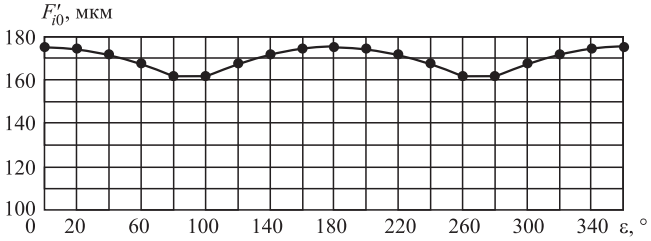

Рис. 4. Графики F_{i0}' для $u = 2$

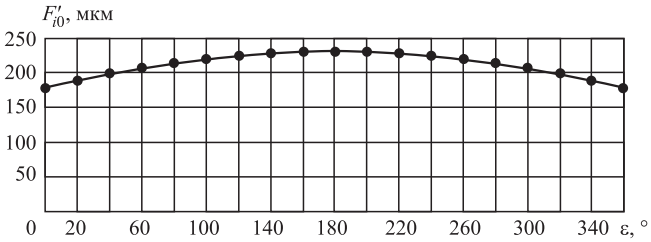

Рис. 5. Графики F_{i0}' для $u = 3$

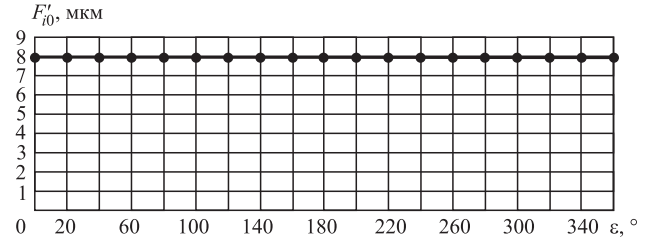

Рис. 6. Графики F_{i0}' для $u = 0{,}94$

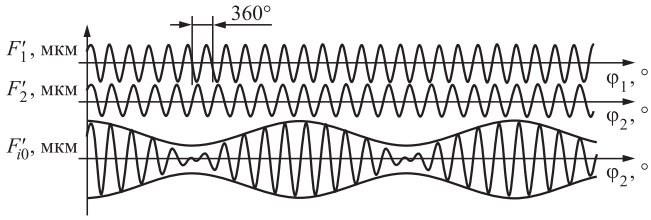

Рис. 7. Схема сложения гармоник погрешностей колёс

Для оценки эффективности минимизации кинематической погрешности предлагаем определить величину эффекта выставки:

$$\eta_{\text{выс}} = \frac{F_{i0\max}' - F_{i0\min}'}{F_{i0}'} \cdot 100\%.$$

Таблица 1

Эффект выставки $\eta_{выс}$, %, для передачи с модулем m = 5 мм

k	Передаточное число u									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	66,7	6,0	20,9	2,5	9,5	1,3	5,6	0,8	3,4	0,6
4	69,4	6,5	21,8	2,6	9,9	1,4	5,8	0,9	3,5	0,6
5	74,1	6,7	22,6	2,7	10,1	1,4	5,9	0,9	3,6	0,6
6	76,2	6,9	23,1	2,8	10,3	1,5	6,0	0,9	3,7	0,6
7	76,3	6,9	23,1	2,8	10,3	1,5	6,0	0,9	3,6	0,6
8	75,9	6,9	23,1	2,8	10,3	1,5	6,0	0,9	3,6	0,6

Таблица 2

Оптимальная начальная фаза ε, °, для передачи с модулем m = 5 мм

k	Передаточное число u									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	180	80	0	80	180	80	0	100	180	280
4	180	100	0	80	180	100	0	100	180	280
5	180	80	0	260	180	100	0	100	180	80
6	180	100	0	80	180	80	0	80	180	280
7	180	80	0	80	180	80	0	100	180	80
8	180	80	0	80	180	80	0	80	180	280

Значение величины F'_{i0} получено непосредственно сложением амплитуд циклических погрешностей [10]:

$$F'_{i0} = F_{p1} + f_{f1} + F_{p2} + f_{f2}.$$

Значения эффекта выставки приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены значения начальных фаз ε для m = 5 мм и k = 3...8.

Выводы:

1. При передаточных числах u = 1, 5, 9 кривая $F'_{i0}(\varepsilon)$ имеет один ярко выраженный минимум при ε = 180°, что было давно известно для u = 1, но совсем неочевидно при u = 5 и 9. Наличие одного минимума кривой $F'_{i0}(\varepsilon)$ свидетельствует о том, что вариант сборки при $F'_{i0\min}$ единственный.

2. При чётных передаточных числах (u = 2, 4, 6, 8, 10) кривая имеет два минимума, причём при значениях ε, отличающихся на 180°, т. е. значение $F'_{i0\min}$ обеспечивается при двух различных вариантах сборки.

3. При u = 3, 7 значение $F'_{i0\min}$ обеспечивается при ε = 0 (360°), т. е. вариант сборки при $F'_{i0\min}$ единственный.

4. Эффект выставки явно ослабевает с ростом u, причём для нечётных значений он существенно выше, чем для чётных (см. табл. 2).

5. С увеличением u эффект выставки уменьшается, другими словами, кинематическая точность передач более стабильна при бóльших u.

Библиографические ссылки

1. **ГОСТ 1643—81.** Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: Изд-во стандартов, 2003. 45 с.

2. **Мерзликина Н.В., Секацкий В.С., Титов В.А.** Взаимозаменяемость и нормирование точности: учеб. пособие. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011. 192 с.

3. **Тимофеев Б.П., Сачков М.Ю.** Передаточные механизмы приводов. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 103 с.

4. **Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В.** К новому уровню точности отечественных зубчатых колёс, передач и редукторов // Технология машиностроения. 2013. № 1. С. 64—68.

5. **Тимофеев Б.П.** Повышение качества зубчатых колёс и передач путём разработки новых стандартов // Приборы. 2013. № 9 (159). С. 37—40.

6. **Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В.** Нормы точности зубчатых колёс и передач: нужен новый стандарт // Стандарты и качество. 2010. № 5. С. 60—63.

7. **Тимофеев Б.П., Новиков Д.В.** Новые стандарты по точности зубчатых колёс и передач — необходимое условие повышения конкурентоспособности отечественного редукторостроения // Вестник машиностроения. 2013. № 5. С. 85—87.

8. **Тимофеев Б.П.** Стандартизация параметров точности зубчатых колёс и передач // Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: Труды МНТК, 27—28 апреля 2010 г. С. 10—14.

9. **Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В.** Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колёс и передач // Вестник машиностроения. 1990. № 12. С. 34—36.

10. **Тимофеев Б.П.** Характеристики распределения погрешностей передаточного отношения пары зубчатых колёс и простого ряда // Известия вузов. Машиностроение. 1985. № 2. С. 20—26.

11. **Тимофеев Б.П.** Передаточное отношение пары зубчатых колёс // Известия вузов. Машиностроение. 1980. № 6. С. 19—23.

Ссылка для цитирования

Тимофеев Б.П., Данг Н.Т. Автоматизация процесса сборки зубчатых передач // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 483—487.

УДК 539.122.2

С.Н. Григорьев-Фридман
(Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород)
sergey-fridman@mail.ru

ДАТЧИК ПАНОРАМНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦЕЛИ И УНИЧТОЖЕНИЯ ПРОТИВНИКА ПО МОДУЛИРОВАННОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЛУЧУ НАВЕДЕНИЯ В 3D-ПРОСТРАНСТВЕ «ЛАДОГА-1М»

Предложен технологически простой и надёжный оптически-лазерный способ пеленгации, обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве экипажами бронетехники, самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок в режиме радиомолчания с применением полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом.

Ключевые слова: датчик; панорамное обнаружение; уничтожение противника; телескопический угол охвата цели; облучение; модулированный лазерный луч; оптический диапазон; режим радиомолчания; полупроводниковый лазерный диод; твёрдотельный лазер с накачкой лазерным диодом; фотон; электромагнитная волна; фотодатчик; фототранзисторная матрица; лазерное излучение; длина волны; частота сигнала.

A technologically simple and reliable optical-laser method of location, target detection and destruction of the enemy by using a modulated laser beam pointing in 3D-space by the crews of armored vehicles, airplanes, helicopters, above-water ships and submarines in the radio silence mode using semiconductor laser diode or solid-state laser pumped by a laser diode is proposed.

Keywords: sensor; panoramic detection; the destruction of the enemy; telescopic angle of target coverage; exposure; modulated laser beam; optical diapason; radio silence mode; semiconductor laser diode; solid-state laser pumped by a laser diode; photon; electromagnetic wave; photo sensor; phototransistor matrix; laser radiation; wavelength; signal frequency.

Введение. Предлагаемый датчик панорамного обнаружения и уничтожения противника «Ладога-1М» на базе полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом может быть использован в бортовых терминалах лазерных систем пеленгации, обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве экипажами бронетехники, самолётов, вертолётов, надводных кораблей и подводных лодок в режиме радиомолчания.

В России [1—13] и за рубежом [14—16] существует значительное число аналогов датчика «Ладога-1М», содержащих разнообразные типы и виды лазерных систем постоянного, круглосуточного, всепогодного слежения за спутниками и специальными целями противника как в открытом космосе, так и в плотных слоях атмосферы Земли, густом тумане, дожде, снеге, различных газах, озоне и т. п. Все эти аналоги имеют общие недостатки: большую сложность, порой громоздкость, излишние массу и внешние габариты, некорректную работу при интенсивной облачности из-за применения очень мощных лазерных установок, которые для того чтобы пробить толстые и оптически плотные слои земной атмосферы, озона и других сред, вынуждены уменьшать частоту, т. е. увеличивать длину поперечной электромагнитной волны при индуцированном когерентном излучении фотонов в лазерах. Тем самым выдаются точные координаты местонахождения, длина и частота электромагнитной волны лазерных систем наведения, удержания обнаруженной цели и облучения противника телескопическим лучом, на которых работают современные аппараты пеленгации, обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве.

В данной статье развивается идея российских учёных в области прикладного применения специальной лазерной техники в авиа-

ции и на флоте, предложенная впервые в мире в работах [17—19]. Актуальность данной идеи состоит в следующем. Сама система лазерной связи, пеленгации, обнаружения и уничтожения противника применяется в открытом космическом пространстве относительно давно и успешно, но её применение в плотных слоях земной атмосферы представляло существенные технологические трудности, а также было мало изучено в своей теоретической основе. При прежних способах лазерного обнаружения, слежения и уничтожения цели для нанесения превентивного удара по агрессору расходовалось огромное количество потребляемой электроэнергии, из-за чего себестоимость такого пеленга была на порядок выше, чем при использовании классической антенно-фидерной формы радиопеленгации в радиоволновом диапазоне. Поэтому такой тип пеленгации цели и обнаружения противника был весьма неэффективен и неэкономичен.

Анализ проблемы обеспечения эффективного пеленга противника и рекомендации по её решению. Для наведения ракеты на цель (самолёт-нарушитель или беспилотный летательный аппарат (БЛА) — разведчик) в современных средствах ПВО и ПРО используется особое устройство — лазерный целеуказатель. К таким устройствам относится и предлагаемый датчик панорамного обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве «Ладога-1М», излучающий модулированный лазерный луч, состоящий из узкого когерентного потока фотонов. Принцип наведения ракеты или артиллерийского снаряда очень прост: на обнаруженную цель направляется лазерный луч, который, отражаясь от неё, улавливается фотодатчиками головки самонаведения (ГСН). Лазерный луч принимается ГСН ракеты, которая отправляет сигнал системе управления ракетой. Модулированный луч «удерживает» ракету или снаряд в нужном направлении и обеспечивает точное попадание в обнаруженную цель [1—13].

Для эффективного применения ракеты цель должна быть в течение нескольких секунд подсвечена лазерным лучом, чтобы ГСН захватила его отражение. После пуска ракеты цель по-прежнему должна подсвечиваться для обеспечения точного попадания. Необходимо помнить, что цель чаще всего является подвижной. Ограниченная мощность систем подсветки цели приводит к ограничениям использования лазерного оружия по дальности и высоте (как правило, до 30 и 10 км соответственно). Лазерный целеуказатель обычно находится на самолёте—носителе оружия или на самолёте-корректировщике. В обоих случаях самолёт целеуказания оказывается ограниченным в манёвре и уязвимым для средств ПВО и систем ПРО потенциального противника. Боевое маневрирование и последующее пикирование самолёта ведут к срыву захвата цели и промаху системы поражения цели [1—4, 6—13, 17, 18].

Хотя современные крылатые ракеты с лазерными ГСН и обладают очень высокой точностью, они не являются «абсолютным оружием», а предназначены главным образом для нанесения эффективного и упреждающего удара по живой силе и военной технике противника или агрессора, но при этом не должно быть многочисленных человеческих жертв среди мирного населения. Это продемонстрировано в ходе военной операции в Сирии.

На броне танка Т-14 «Армата» установлены специализированные датчики и радиолокационная система (РЛС) с активной фазированной антенной решёткой (АФАР), которые улавливают пеленгующий лазерный луч противника. Система мгновенно реагирует на лазерное излучение фотонов и по траектории скольжения падающего луча направляет в ответ артиллерийский снаряд или противотанковый управляемый реактивный снаряд (ПТУРС) для уничтожения неприятеля [1—14].

Танк Т-14 может использоваться как бронемашина разведки, целеуказания и корректировки огня самоходных артиллерийских установок (САУ), зенитных ракетных комплексов (ЗРК) и танков Т-90 как основного тактического звена мобильного бронетанкового «кулака» в ВДВ и сухопутных подразделениях современной российской армии. Для этого в Т-14 имеется радиолокационный комплекс с круговой (360°) доплеровской АФАР — радар средней дальности, ультрафиолетовые HD-камеры наблюдения также с круговым охватом (на 360°), способные детектировать работу двигателей техники по выхлопу ионизированного газа [5—8].

Танк Т-14 спроектирован на основе «стелс»-технологии, что обеспечило ему кардинальное снижение видимости в инфракрасном (ИК), радио и магнитном диапазонах. Это сокращает дистанцию захвата цели ГСН противотанковых управляемых ракет (ПТУР) противника «Джавелин» (Javelin), «Спайк» (Spike) или «Бримстоун» (Brimstone) и аналогичных

им в 2,7 раза даже без использования танком аэрозолей [1—14].

В системе LCPK (laser guidance), установленной на танке Т-14, полуактивная лазерная ГСН спроектирована таким образом, что объективы обнаружения и слежения находятся на крыльях ракеты, а фотоприёмники — в самом её корпусе и связаны между собой и системой управления ГСН оптоволокном [1—14].

Цель обычно подсвечивается модулированным лучом, чтобы осложнить создание ложной отметки на мониторе радара, а ГСН на ракете или бомбе наводится именно на эту отметку. В ГСН установлены относительно недорогие четырёхквадрантный фотодиод и оптика. По такому принципу спроектированы американские ракеты «Хелфайер» (Hellfire) и «Пеивувей» (Paveway), а также российские корректируемые авиабомбы (КАБ) 500Л, 1500Л и Х29Л [1—18].

Блок наведения противотанкового ракетного комплекса «Корнет» формирует своеобразный оптический «туннель», в котором удерживается боевая ракета-перехватчик. На ракете стоит «смотрящий» назад фотоприёмник, и когда ракета отклоняется от направления на цель, сигнал с него определяет, в какую сторону должны отработать рули, чтобы вернуть траекторию движения ракеты на заданный курс [1—14].

Основной отличительной особенностью предлагаемой конструкции датчика панорамного обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве «Ладога-1М» в отличие от российских и зарубежных аналогов является возможность успешно использовать монохроматическое когерентное излучение модулированного лазерного луча узконаправленного действия на тех частотах или длинах волн в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы Земли, где КПД облучения фотонами поверхности цели будет максимальным.

На экспериментальном полигоне в г. Жуковский в сырую, дождливую погоду, при густом тумане и сильном снегопаде был выявлен факт свечения полосы вдоль прохождения узкого лазерного луча на длинах волн 800...820 нм из-за резкого увеличения значения угла Тиндаля при облучении с датчиков фотонами поверхности предполагаемой цели на военных учениях, с использованием танков Т-14 «Армата», вертолётов К-52, самолётов МиГ-35 и Су-35С. На длинах волн 955...956 нм эффект распада лазерного луча и полосы свечения не обнаруживается. Диапазон длин волн 765...820 нм представляет собой пограничный слой между видимым поддиапазоном (отражённые видеолучи с длинами волн 380...760 нм, на которые реагирует человеческий глаз) и ближней, невидимой зоной ИК-диапазона электромагнитных волн.

Датчик «Ладога-1М» выполнен на основе полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом вместо плоской, электромагнитной волны ТЕМ-типа в воздушном пространстве, излучаемой обычной авиационной или иной армейской антенной в современных РЛС ближнего и дальнего обнаружения противника.

В конструкции датчика «Ладога-1М» предлагается использовать полупроводниковый лазерный диод на основе арсенида галлия (GaAs) и арсенида алюминия-галлия (GaAlAs) либо твёрдотельного излучающего лазера с накачкой лазерным диодом. Твёрдотельный лазер выполнен по полупроводниковой технологии, с активным использованием модифицированного рубинового кристалла Al_2O_3—Cr_2O_3 (с примесью ионов хрома Cr^{+3} и обязательным вкраплением в базовый рубиновый кристалл примеси ионов неодима Nd^{+3} и кобальта Co^{+3}) [17—19]. При этом необходимым условием является то, что длина волны спроектированного полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера должна полностью войти в зоны или «окна прозрачности» атмосферы Земли [17—19].

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату к предлагаемому изобретению является устройство лучевого наведения управляемого объекта, защищённое патентом [3], принятое за ближайший аналог (прототип). Недостатком этого устройства является технологическая сложность, большие масса и габариты, относительно большое потребление электроэнергии, высокая себестоимость сеансов лазерного пеленга, обнаружения и удержания цели в зоне телескопического угла в момент облучения противника модулированным лазерным лучом. При использовании данного способа пеленга и обнаружения противника возникают существенные трудности при работе в условиях интенсивной облачности, различных осадков, задымлённости, плотных слоёв атмосферы Земли и др. При создании датчика «Ладога-1М» на базе полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом указанные недостатки устранены.

Конструкция и принцип работы датчика «Ладога-1М». Решение поставленной при создании датчика задачи достигнуто тем, что в его конструкции (рис. 1) содержится как минимум пара полупроводниковых лазерных диодов или твёрдотельных лазеров с накачкой двумя лазерными диодами, запитанных от положительной клеммы стабилизатора напряжения *12* и блока бесперебойного питания *13* на анод диода. Катод диода соединён прямым проводом, через цепочку сток-исток полевого транзистора — коммутирующего устройства-ключа VT1 или VT2, с двумя переменными регулировочными резисторами, выполненными на базе потенциометров RP1 *14* и RP2 *15*, или с постоянными проволочными резисторами для ограничения предельного уровня питания коммутирующих устройств — двух полевых транзисторов VT1 и VT2 по току. Следует отметить, что внутри каждой из двух (или нескольких) лазерных панорам *6* и *7* имеется своё отдельное коммутирующее устройство-ключ VT1-1 или VT2-2. В качестве цели *1* можно выбрать самолёт потенциального противника. Отражённые от цели видеолучи *2* видимого поддиапазона и/или невидимого поддиапазона ИК-диапазона электромагнитных волн улавливаются и фокусируются внешней подвижной линзой *3* регулируемого коллиматора *3—4—5* в приёмной оптической системе датчика. В схему датчика входят внешняя подвижная оптическая линза *3* регулируемого коллиматора в оптическом монокуляре; основная стационарная (неподвижная) оптическая линза *4* регулируемого коллиматора; внутренняя подвижная оптическая линза *5* регулируемого коллиматора; первая, положительная, лазерная панорама *6*, работающая по приёму-передаче лазерного луча в ближнем и частично в среднем, пограничном, поддиапазонах ИК-диапазона электромагнитных волн по часовой стрелке, например, на длине волны $\lambda = 820$ нм; вторая, отрицательная, лазерная панорама *7*, работающая по приёму-передаче лазерного луча в ближнем и частично в среднем, пограничном, поддиапазонах ИК-диапазона электромагнитных волн против часовой стрелки, например, на длине волны $\lambda = 955$ нм; блок стабилизатора постоянного напряжения *12* из стандартного ряда $U_{_} = 0{,}1 \pm 0{,}01$, ..., $0{,}5 \pm 0{,}05$, ..., $1{,}0 \pm 0{,}1$, ..., $5{,}0 \pm 0{,}25$, ..., $9{,}0 \pm 0{,}25$, ..., $12 \pm 0{,}25$, ..., $15 \pm 0{,}25$, ..., $18 \pm 0{,}25$, ..., $24 \pm 0{,}25$ В; блок источника постоянного (выпрямленного) напряжения *13*, $U_{вых_\sim} = 24$ В, с коэффициентом гармоник $\gamma \leqslant 2$ %; переменный регулировочный резистор *14* на базе потенциометра RP1, предназначенный для ограничения предельного уровня питания током первой, положительной, лазерной панорамы на базе лазерного диода (или же твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом) VD1; переменный регулировочный резистор *15* на базе потенциометра RP2, предназначенный для ограничения предельного уровня питания током второй, отрицательной, лазерной панорамы на базе лазерного диода (или же твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом) VD2; выпрямительный блок *16* на основе

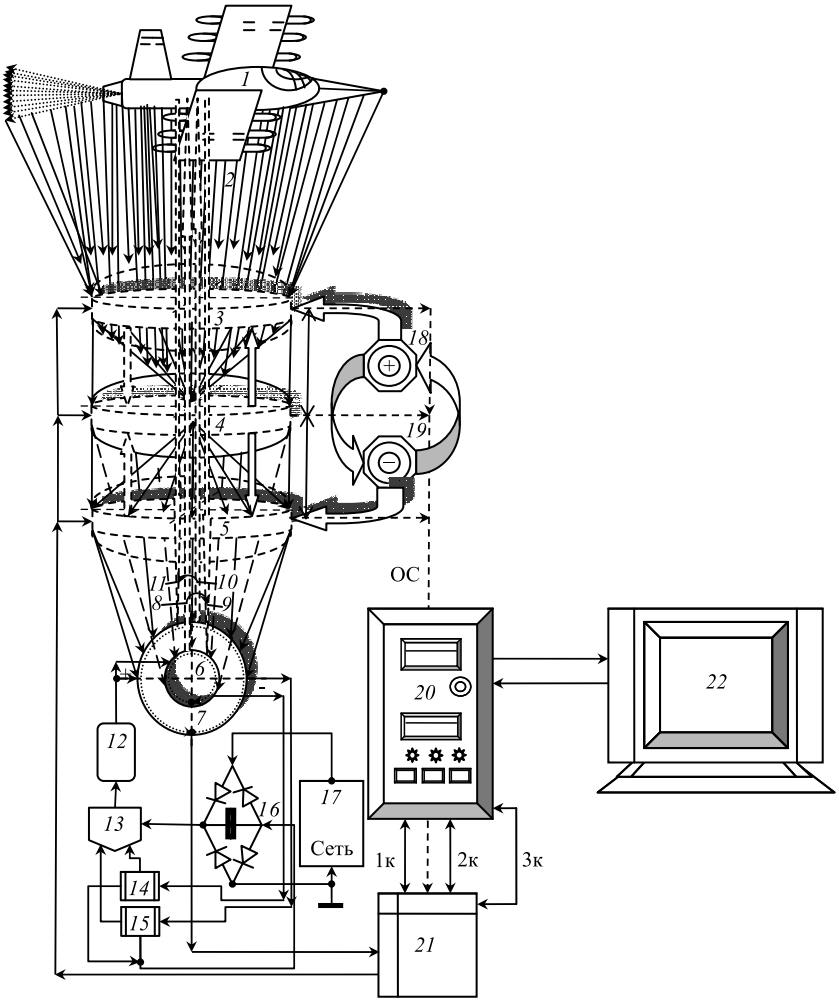

Рис. 1. Схема и принцип работы датчика «Ладога-1М»

четырёх выпрямительных диодов и сглаживающего пульсации выпрямленного тока и напряжения конденсатора большой ёмкости, например, на рабочее напряжение 50 В и ёмкость 2000 мкФ (или же два конденсатора ёмкостью 1000 мкФ каждый, соединённых параллельно между собой); бортовая сеть (например, самолёта) переменного напряжения *17*, $U_{\sim}$ = = 27 В; кнопка *18* увеличения панорамного изображения цели путём увеличения фокусного расстояния между коллиматором и датчиком; кнопка *19* уменьшения панорамного изображения цели путём уменьшения фокусного расстояния между коллиматором и датчиком; ЭВМ (компьютер) *20*; блок АЦП—ЦАП *21*; монитор (экран) *22*.

Для пояснения принципа работы датчика «Ладога-1М» на рис. 1 показаны падающий лазерный луч *8*, идущий из первого лазера к обнаруженной цели; лазерный луч *9*, отражённый от цели и принятый фотодатчиком (на базе фотодиода или же составного, например трёхкаскадного, фототранзистора); падающий лазерный луч *10*, идущий из второго

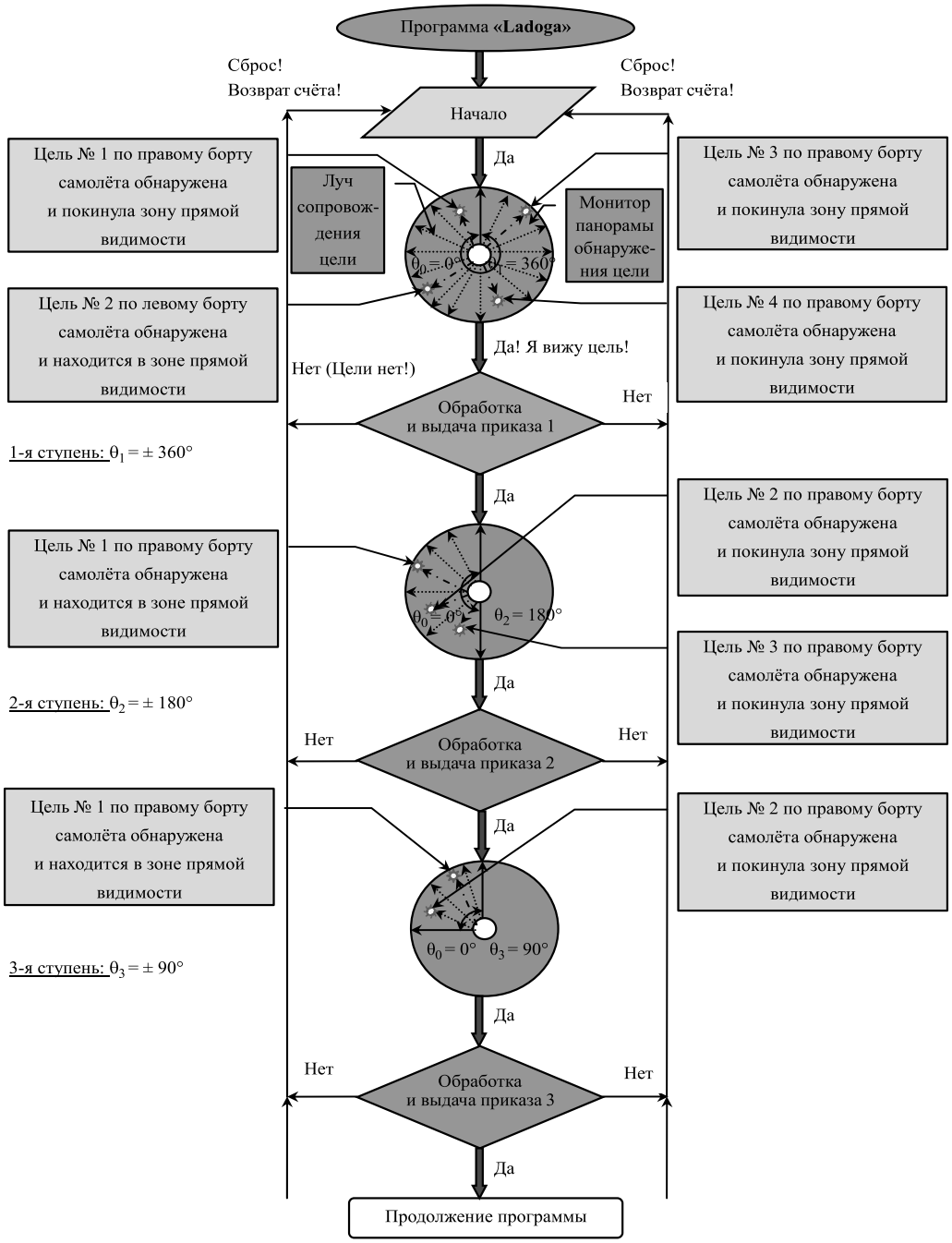

Рис. 2. Алгоритм работы датчика «Ладога-1М»

лазера к цели; лазерный луч *11*, отражённый от цели и принятый фотодатчиком (фотодиодом или фототранзистором). Необходимо помнить, что лазерные лучи *8* и *10* облучают поверхность цели фотонами чаще всего на разных длинах волн и частотах.

Между подвижными оптическими линзами в регулируемом коллиматоре и компьютером с монитором через блок АЦП—ЦАП осуществляется постоянная обратная связь (ОС), обеспечивающая оперативную и эффективную регулировку процесса юстировки лазерного луча на предполагаемую цель и удержание противника в зоне оптимального охвата телескопического угла пеленгации.

Светочувствительный фотодатчик выполнен в виде фотоприёмной матрицы на базе высокочувствительного фотодиода марки ФД256, или составного (трёхкаскадного) фототранзистора на основе ФТ-К [17—19].

На рис. 2 представлен алгоритм работы датчика «Ладога-1М». Циркуляционно-круговая лазерная ГСН постоянно удерживает обнаруженную цель в зоне полного, всеохва-

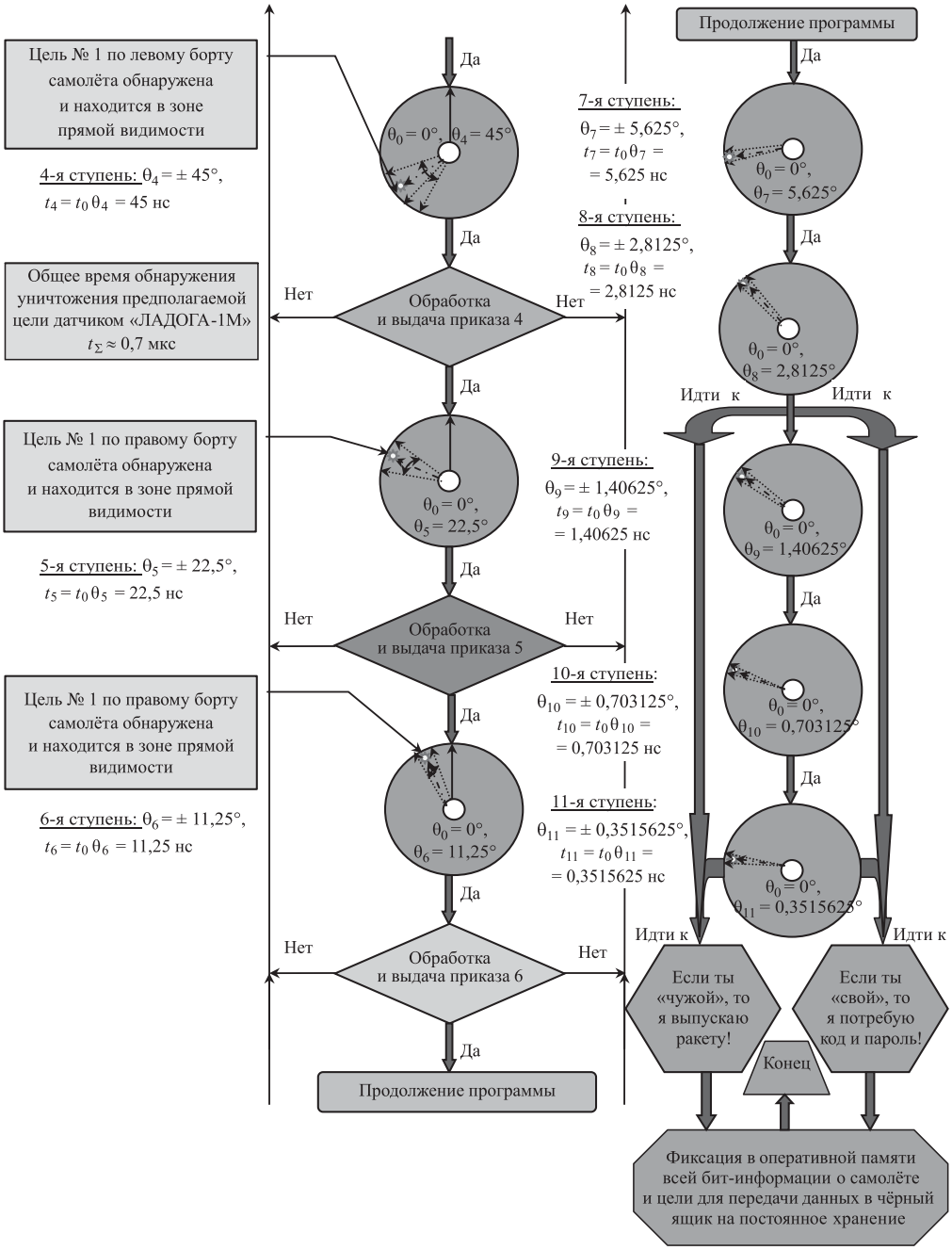

Рис. 2. Алгоритм работы датчика «Ладога-1М» (окончание)

тывающего, телескопического угла (1-я ступень — $\theta_1 = 360°$) и следит за поведением обнаруженной цели. Из программного комплекса «Ладога» через блок АЦП—ЦАП на лазерную ГСН поступает сигнал об уменьшении в два раза телескопического угла охвата обнаруженной цели (2-я ступень — $\theta_2 = 180°$). Через несколько операционных процедур — делений (дробления) угла охвата обнаруженной цели ровно на половину (3-я ступень — $\theta_3 = 90°$, 4-я ступень — $\theta_4 = 45°$, 5-я ступень — $\theta_5 = 22°30'$, 6-я ступень — $\theta_6 = 11°15'$, 7-я ступень — $\theta_7 = 5°37'30''$, 8-я ступень — $\theta_8 = 2°48'45''$, 9-я ступень — $\theta_9 = 1°24'22{,}5''$, 10-я ступень — $\theta_{10} = 0°42'11{,}25''$, 11-я ступень — $\theta_{11} = 0°21'5{,}625''$ и т. д.) получают точные координаты цели. Общее время пеленга и удержания цели в телескопическом угле равно 750 нс. Величина θ_n ($n = 1, 2, 3, ..., N$) — есть среднее значение угла разброса нахождения луча сопровождения цели для каждой ступени из-за ВЧ-колебаний корпуса самолёта и определяется формулой

$$\theta_n = \pm\frac{360°}{2^{(n-1)}} = \pm\frac{2\pi}{2^{(n-1)}} = \pm(2^1 \cdot 2^{-(n-1)})\pi = \\ = \pm 2^{(2-n)}\pi\Big|_{n=1,2,3,\ldots,N} = \pm 2^{(2-n)} \cdot 180°\Big|_{n=1,2,3,\ldots,N}. \quad (1)$$

Регулировка блока питания (см. рис. 1) выполняется путём выборочного изменения выходного напряжения: $3 \leqslant U_{вых} \leqslant 32$ В изменением электрического сопротивления переменного подстроечного резистора — потенциометра RP1 марки W103 или же ограничением выходного тока $I_{вых}$ путём регулировки выходного тока: $0 < I_{max\ раб\ вых} \leqslant 8$ А изменением электрического сопротивления переменного подстроечного резистора — потенциометра RP2 марки W103. Это позволяет не вывести нагрузку ($R_{нагр}$) из строя при превышении максимально допустимого значения тока нагрузки. Таким образом, максимально возможное значение выходной мощности блока питания $P_{max\ доп\ вых}$, изготовленного в совмещённом варианте, на единой плате, в одном корпусе, экранированном от внешних помех и ВЧ-наводок, определяется диапазоном $0 < P_{max\ доп\ вых} \leqslant 256$ Вт.

Блоки источника питания *13* и стабилизатора напряжения *12* (см. рис. 1), совмещённые в одном корпусе, выполнены, например, на двусторонней стеклотекстолитовой плате толщиной $\Delta h = 1{,}5$ мм. Рабочая плата с двусторонним монтажом навесных элементов в большинстве случаев изготавливается в ЧИП-исполнении гальваническим травлением, маточно-сеточным методом с применением фотошаблона. Геометрические размеры платы с печатным узлом по обе стороны составляют 65 × 35 мм. Теплоотводящий радиатор выполнен из алюминиевого сплава, например А95. Геометрические характеристики радиатора следующие: высота рёбер $h = 10$ мм, ширина ребра $d = 20$ мм, длина радиатора $l = 46{,}5$ мм, толщина ребра $k = 1{,}2$ мм, число рёбер $n = 10$.

Конструктивно совмещённые блок стабилизатора выходного напряжения с регулируемым током нагрузки *12* и блок источника питания *13* (см. рис. 1) выполнены в одном корпусе по схеме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Роль задающего генератора стандартных ВЧ-импульсов играет интегральная микросхема (ИМС) аналогового типа AD1 марки XL SEMI — XL4016E1 зарубежного производства (российский аналог — ИМС AD1 марок КРЕН1В, К142ЕН5А, К142ЕН8В или К1234ЕН3) на стандартные напряжения: 3,0 ± 0,1; 5,0 ± 0,25; 9,0 ± 0,25; 12 ± 0,25; 15 ± 0,25 В. В качестве переключающего ключа Q1 используется полевой транзистор VT1 импортного производства, марки G15 — Y2010DN, либо отечественный, например, марки 2П769А9 или 2П7229А (2П7229А5).

Принципиальная электрическая схема Э3 источника питания *13* вместе с блоком стабилизации выходного напряжения и регулируемого тока нагрузки *12* предусматривает использование двух конденсаторов с ёмкостями $C_{1вх} = C_{2вх} = 470$ мкФ (или одного конденсатора с ёмкостью $C_{1вх} = 1000$ мкФ) на напряжение $U_{вх\ раб} \leqslant 50$ В, соединённых на входе рабочей цепи схемы Э3 параллельно в качестве сглаживающего входного фильтра от ВЧ-радиопомех и наводок. Схема Э3 источника питания *13* и стабилизатора *12* предусматривает также монтаж двух конденсаторов с $C_{3вых} = C_{4вых} = 1000$ мкФ на $U_{вх\ раб} \leqslant 35$ В, соединённых на выходе рабочей цепи схемы параллельно в качестве сглаживающего выходного фильтра от ВЧ-радиопомех и наводок, которые могут поступить на вход цепи питания, а также для эффективного сглаживания выпрямленного тока, поступающего с выпрямительного участка электрической цепи ИМС AD1 и VT1.

Роль аккумулятора энергии в электрической цепи блока питания выполняет ВЧ-дроссель L1, выполненный на базе ВЧ-феррита, например марки 2000НМ, с магнитной индукцией насыщения сердечника $B_{нас} = 0{,}39$ Тл. Витки дросселя выполнены сдвоенным мед-

ным проводом диаметром 0,85 мм. Число витков $N = 46$.

Функцию индикатора подачи входного выпрямленного пульсирующего напряжения с частотой следования полусинусоидальных импульсов $f = 100$ Гц выполняет светодиод белого цвета, например марки AL307 отечественного производства.

Циркуляционно-круговая головка наведения и удержания цели в зоне телескопического угла обнаружения и слежения за поведением обнаруженной цели выполнена на базе полупроводникового лазерного диода, лазерного диода на основе двойной гетероструктуры из GaAs и GaAlAs или твёрдотельного лазера с накачкой мощным светодиодом или полупроводниковым лазерным диодом [17—19]. Лазерная ГСН обнаружения и слежения за целью выполнена в виде многоступенчатых слоёв для лазерного облучения когерентным узконаправленным потоком фотонов. Лазерный луч слоя № 1, например, движется по кругу, радиально, от центра до окружности, по часовой стрелке, облучая поверхность цели фотонами, от датчика к обнаруженной цели и обратно, к фотоприёмной матрице самого датчика, на длине волны первого лазера $\lambda_1 \approx 820$ нм. Лазерный луч слоя № 2, например, также движется по кругу, радиально, от центра до окружности, против часовой стрелки, облучая поверхность цели фотонами, от датчика к обнаруженной цели и обратно, к фотоприёмной матрице самого датчика, на длине волны второго лазера $\lambda_2 \approx 955$ нм. Следующие слои лазерной ГСН (при необходимости) последовательно облучают поверхность цели фотонами, двигаясь радиально, по траектории, напоминающей раскручивающуюся спираль Архимеда, от центра до окружности с максимальным радиусом охвата цели, по часовой или же против часовой стрелки, с длинами волн лазеров $\lambda_3 \approx 1250...1300$ нм, $\lambda_4 \approx 1550$ нм и $\lambda_5 \approx 2100...2150$ нм соответственно и т. д. Причём все эксплуатационные частоты и длины волн лазеров выбираются из поддиапазонов ближнего и в редком случае пограничного слоя с $\lambda_6 \approx 3500...3885$ нм (граничит с диапазоном радиоволн), среднего поддиапазона ИК-диапазона электромагнитных волн, где экспериментально обнаруживается максимальное значение коэффициента пропускания мощности модулированного сигнала в телескопической толще лазерного луча [17—19].

Конструкция датчика «Ладога-1М» предполагает эффективное использование как минимум двух модулированных лазерных лучей, двигающихся синхронно друг относительно друга, один по часовой, а другой против часовой стрелки, что обеспечивает эффективный и быстрый радиопеленг для обнаружения и уничтожения цели.

В состав датчика «Ладога-1М» входит сдвоенная, связанная система двух монокуляров с кратностью увеличения или уменьшения изображения цели в оптической системе регулируемого коллиматора, например от 2 до 100 ($2 \leqslant \delta_{кратн} \leqslant 100$), а также блок цифровой HD-видеокамеры типа Digital Camera на 50...60 Мпкс с высоким уровнем разрешения не менее 3000×3000 пкс [17—19].

Микропанорама датчика и выпуклый объёмный монитор выполнены на базе уменьшенной копии панорамы визуализации и фиксации обнаружения цели от модернизированных РЛС-300, РЛС-500 и РЛС-1500, успешно применяющихся в ВКС, войсках ПВО и системах ПРО России.

На рис. 3 приведены зависимости амплитуды колебания корпуса самолётов Су-35С, МиГ-35 $\delta(t)$ и скорости самолёта $\upsilon(t)$ во время взлёта, прохождения основного маршрута, отключения двигателей, торможения и полного останова на взлётно-посадочной полосе. Эти зависимости были получены экспериментально с использованием датчика «Ладога-1М», установленного на борт самолёта, на лётно-испытательном полигоне в г. Жуковский. Из рис. 3 следует, что датчик «Ладога-1М» наиболее эффективно используется в момент достижения самолётом крейсерской скорости: $\upsilon(t) = \upsilon_{крейс}(t) = (0{,}80...0{,}85)\upsilon_{max}(t)$, когда амплитуда колебаний корпуса самолёта близка к минимальному значению: $\delta(t) = \delta_{min}(t)$. На рис. 3 представлены следующие характерные моменты и этапы полёта самолёта: $t_0 = 0$ — начало отсчёта времени полёта; $t_{1res\ max}$ — время наступления разрушительного резонанса НЧ-колебаний корпуса самолёта во время набора высоты и скорости; $t_{уст}$ — время выхода из опасной зоны разрушительных НЧ-колебаний после набора номинальных высоты $h_{ном}$ и крейсерской скорости; $t_1 = t_{1res\ max} + t_{уст}$ — расчётное время выхода самолёта на основной эксплуатационный крейсерский режим (номинальные мощность, высота и крейсерская скорость); t_2—t_1 — время полёта при $h_{ном} \approx \text{const}$ и $\upsilon_{крейс} \approx \text{const}$; t_2 — время отключения двигателей при высоте $h_{ном} < h_{max}$ и скорости $\upsilon_{откл} < \upsilon_{крейс}$; $t_{3res\ max}$ — время наступления разрушительного резонанса НЧ-колебаний кор-

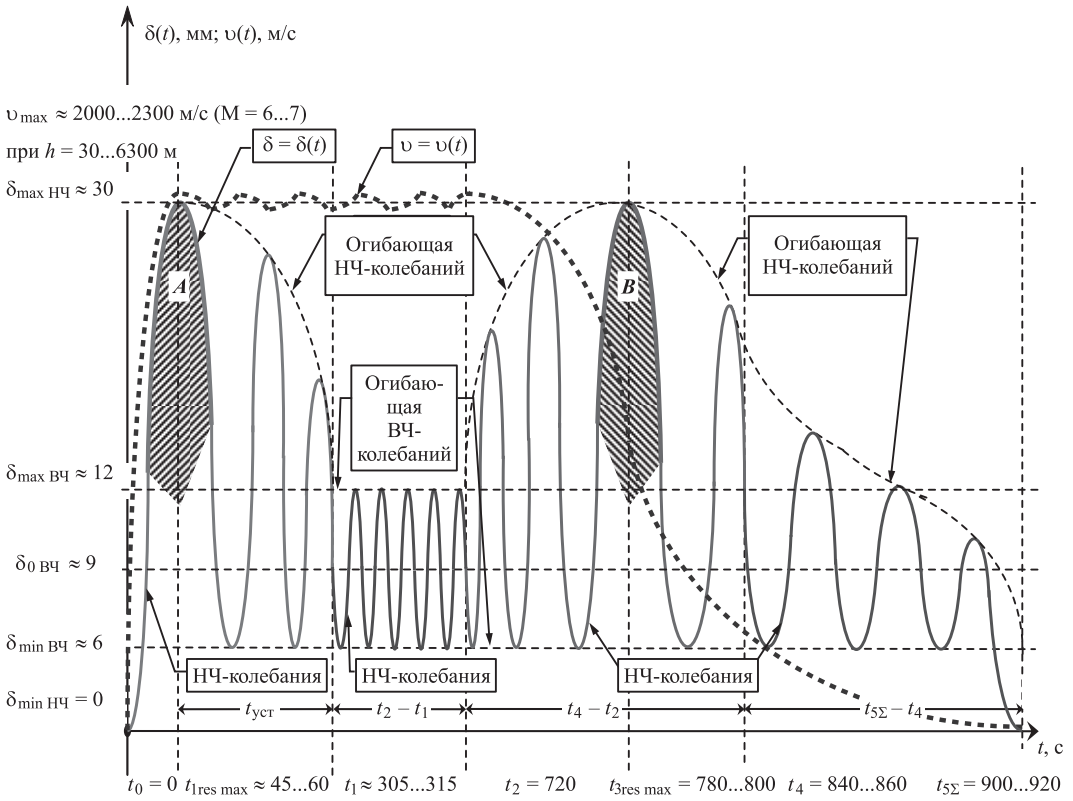

Рис. 3. Графики зависимости амплитуды колебания корпуса самолёта δ(*t*) и скорости самолёта υ(*t*) от времени, в периоды взлёта, прохождения основного маршрута, отключения двигателей, торможения и полного останова на взлётно-посадочной полосе аэродрома

пуса во время уменьшения высоты и скорости самолёта, во время бреющего полёта с отключёнными двигателями; t_4—t_2 — время торможения в зоне разрушительных НЧ-колебаний; t_4—$t_{3\text{res max}}$ — время выхода из опасной зоны разрушительных НЧ-колебаний после отключения основных двигателей и уменьшения номинальной высоты и крейсерской скорости самолёта; $t_{5\Sigma}$—t_0 — время останова самолёта и максимальное время нахождения самолёта в полёте и движении по взлётно-посадочной полосе. Характерными зонами с точки зрения колебаний корпуса самолёта являются *A*, *B* — зоны разрушительного НЧ-резонанса корпуса самолёта, соответственно при взлёте и наборе высоты и увеличении скорости, а также при отключении двигателей и возрастающем лобовом сопротивлении корпуса при столкновении с плотными слоями атмосферы Земли, на бреющем полёте; $0 \leqslant t \leqslant t_1$ — зона разрушительных НЧ-колебаний при наборе высоты и скорости самолётом; t_2—t_1 — зона малых ВЧ-колебаний; $t_{5\Sigma}$—t_4 — зона малых НЧ-колебаний при торможении и останове самолёта.

Блок оптического стабилизатора точного наведения и определения (обеспечения) положения, например, самолёта в пространстве выполнен на основе гироскопной технологии [17—19].

Между компьютером *20* (см. рис. 1) и блоком многоканального АЦП—ЦАП *21* выполнена ОС для анализа и амплитудно-частотной коррекции выходных импульсов управления. Она позволяет программному обеспечению (ПО) датчика «Ладога-1М» оперативно регулировать тактовую частоту следования управляющих импульсов, поступающих из блока АЦП—ЦАП *21* на затворы коммутирующих устройств-ключей VT1 и/или VT2, расположенных внутри каждой первой, положительной, и второй, отрицательной, лазерных панорам *6* и *7* [17—19].

Датчик «Ладога-1М» работает следующим образом. Сеанс радиопеленгации и обнаружения цели осуществляют в условиях только прямой электромагнитной видимости для антенн и лазерных ГСН, в невидимой для человеческого глаза части спектра поперечных электромагнитных волн (чаще всего в ИК-диапазоне). За редким исключением возможно использование ультрафиолетового (УФ) диапазона, который не применим в озо-

новом слое атмосферы Земли из-за сильного поглощения волн в озоне. Информационный сигнал может быть закодирован программой, являющейся основным ПО в программном комплексе радиомолчания «Ладога-1М», собранном из компьютера *20* и монитора *22* (см. рис. 1), специальным военным кодером-шифровальщиком и передаваться в блок входного трёхкаскадного усилителя низкой частоты (УНЧ) (находится внутри лазерных панорам *6* и *7*), в котором также могут быть в наличии входной, предварительный усилитель видеосигналов и блок специального кодера цветного изображения. Радиосигнал из блока предварительного входного УНЧ передаётся в блок оконечного двухтактного усилителя мощности (УМ), где он усиливается, как аналоговый сигнал, до своего номинального или оптимального уровня, и затем поступает в многоканальный блок АЦП—ЦАП *21* для преобразования в цифровой формат, необходимый для формирования импульсов управления и последующей их передачи на управляющий электрод — затворы коммутирующих устройств-ключей, выполненных, например, на основе полевого транзистора VT1 или VT2. Блок УМ также находится внутри лазерных панорам *6* и *7* [17—19].

Блок АЦП—ЦАП *21* является многоканальным преобразователем и «переводчиком» поступающих сигналов из аналогового формата в цифровой и обратно с последующей передачей в компьютер *20*, где программы по обработке входных данных в цифровом формате ПО «Ладога» проводят анализ, сравнение и амплитудно-частотную коррекцию импульсов управления для последующей передачи необходимых команд в третий, автономный канал оптической юстировки, точного наведения и соосности двух лазерных систем (см. рис. 1) [17—19].

Аналоговый сигнал поступает из оптического датчика регулируемого коллиматора *3—4—5* в блок самонаведения и удержания цели по модулированному телескопическому лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн и одновременно получает команды внешней системы обнаружения и целеуказания, коррекции с помощью управляющих импульсов, поступающих из блока АЦП—ЦАП *21*. Из-за сильного поглощения электромагнитных волн в озоновом слое атмосферы Земли и опасности облучения и поражения кожных покровов лётных экипажей применение блока самонаведения и удержания цели по модулированному лазерному лучу в УФ-диапазоне электромагнитных волн *3—4—5—6—7* крайне нежелательно [17—19].

В предлагаемом датчике «Ладога-1М» возможно использование трёх лазерных каналов (1к...3к) последовательной пеленгации, облучения и удержания цели в зоне телескопического угла в ближней и частично в пограничном слое средней зоны ИК-диапазона электромагнитных волн [17—19]:

канала пеленгации и последующего облучения выбранной цели и её обнаружения с использованием модулированного лазерного луча (1к);

канала приёма отражённого модулированного лазерного луча от поверхности выбранной цели и определения пространственных координат противника (2к);

независимого, автономного канала оптической юстировки, точного наведения и соосности двух лазерных систем (3к) для постоянного обмена информацией в виде коротких импульсов, подтверждающих точные координаты и взаимное расположение абонентов в пространстве, а также определения по системе кодирования и зашифрованному паролю «свой—чужой» вражеского летательного аппарата в отечественном воздушном пространстве [17—19].

Выводы:

1. Предложен технологически простой и надёжный оптически-лазерный способ пеленгации, обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве экипажами воздушных, надводных и подводных судов в режиме радиомолчания с применением полупроводникового лазерного диода или твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом.

2. Использование в датчике лазерного диода, генерирующего лазерный когерентный узконаправленный луч с длиной волны 955 нм, близкой к максимальным значениям длин волн в «окнах прозрачности» и плотных слоях атмосферы Земли, а также наличие блока оптического стабилизатора точного наведения и горизонтально-вертикального положения в пространстве ракеты (снаряда) и блока самонаведения и удержания цели по модулированному лазерному лучу в ИК-диапазоне электромагнитных волн способствуют повышению эффективности и надёжности работы датчика при интенсивной облачности, различных видах осадков и т. п., поэтому обеспечивают повышение защищённости и скрытности пелен-

гации по сравнению с аналоговыми датчиками и лазерными целеуказателями, работающими в диапазоне длин волн 800..820 нм.

3. Данный вариант датчика является более энергосберегающим по сравнению с аналогом [3] и первым вариантом конструкции представленной модели [17], где используется мощный светодиод в качестве средства накачки и возбуждения твёрдотельного лазера.

4. Разработанное устройство способно передавать и принимать на борт бронетанковой техники, воздушных, надводных и подводных судов закодированную военно-секретную информацию в режиме радиомолчания с использованием в качестве несущей частоты частоты генерации твёрдотельного лазера или лазерного диода с максимальным КПД пеленга и облучения фотонами поверхности обнаруженной цели.

5. В разработанной модели мобильной атмосферной лазерной связи, пеленгации и уничтожения противника используются относительно недорогие марки твёрдотельных лазеров и лазерных диодов отечественного производства.

6. Датчик «Ладога-1М» отличается от предшествующих модификаций [3, 17, 18] тем, что полупроводниковый, компактный, надёжный, лёгко управляемый лазерный диод используется для более эффективной накачки твёрдотельного лазера по сравнению с мощным светодиодом, где тратится значительная часть энергии (из-за низкого КПД мощных облучающих ксеноновых и светодиодных ламп). При этом способе уверенного облучения и качественном приёме отражённой волны модулированного лазерного луча увеличивается практическая дальность лазерной пеленгации и обнаружения противника с 1...3 до 20...25 км.

Библиографические ссылки

1. **Федоров Б.Ф.** Лазеры. Основы устройства и применение. М.: ДОСААФ, 1988. 192 с.

2. **Орлов В.А.** Лазеры в военной технике. М.: Воениздат, 1976. 174 с.

3. **Коршунов А.И., Сторощук О.Б.** Устройство лучевого наведения управляемого объекта // Патент России на изобретение № 2267733. М.: ФИПС РФ, 2006. Бюл. № 1.

4. **Ольгин С.** Проблемы оптоэлектронного противодействия (по взглядам зарубежных военных специалистов) // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 9. С. 35—41.

5. **Григорян В.А., Юдин Е.Г.** и др. Защита танков. Под ред. В.А. Григоряна. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.

6. **Ветров В.В., Грязев М.В.** и др. Основы устройства и функционирования противотанковых управляемых ракет. Под ред. А.Г. Шипунова. Тула: ТГУ, 2006. 182 с.

7. **Борейшо В.А., Клочков Д.В.** и др. Военные применения лазеров. Под ред. А.С. Борейшо. СПб.: БГТУ, 2015. 103 с.

8. **Диков С.А.** Военное применение лазерных технологий // Мир измерений. 2010. № 7. С. 4—16.

9. **Абрамов А.И., Иванов Б.И.** и др. Основные тенденции развития датчиков лазерного излучения // Контенант. 2015. № 3. С. 19—26.

10. **Спасский Н., Иванов С.** Оптико-электронные системы и лазерная техника: Энциклопедия XXI век. Т. 11. М.: Оружие и технологии, 2005. 720 с.

11. **Лазарев Л.П.** Оптико-электронные приборы наведения. М.: Машиностроение, 1989. 512 с.

12. **Щербак Н.** Противодействие зенитным управляемым ракетам с инфракрасным наведением (современные бортовые средства) // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2000. № 5. С. 52—55.

13. **Щербинин Р.** Головки самонаведения перспективных зарубежных управляемых ракет и авиабомб // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 4. С. 64—68.

14. **Laser** Guided Bomb Kits Procurement History / The Acquisition of Weapons Systems: Hearings, 93 Congress, 1 Session. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1974. Pt. 7. P. 2766—2768.

15. **Глебов В.В., Васильченко И.И.** и др. О возможности создания индикаторов лазерного излучения с качественно новыми характеристиками // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Харьків, Украіна. 2013. № 1(60). С. 15—22.

16. **Васильченко И.И., Глебов В.В.** и др. О противодействии лазерным системам наведения противотанкового оружия и боеприпасов // Радіоелектронні і комп`ютерні системи. Харьків, Украіна. 2013. № 2 (61). С. 14—19.

17. **Григорьев-Фридман С.Н.** Мобильное переговорное устройство в оптическом диапазоне в режиме радиомолчания // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 12. С. 6—14.

18. **Григорьев-Фридман С.Н.** Мобильное переговорное устройство на базе лазерного диода // Автоматизация. Современные технологии. 2017. № 12. С. 552—559.

19. **Григорьев-Фридман С.Н.** Мобильное переговорное устройство на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 5. С. 216—222.

Ссылка для цитирования

Григорьев-Фридман С.Н. Датчик панорамного обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве «Ладога-1М» // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 488—498.

УДК 681.5:519.25

Ю.В. Васильков, д-р техн. наук, проф., **А.Н. Камакин,** канд. техн. наук,
И.А. Сергеев, П.А. Фролов
(Ярославский государственный технический университет)

myvas@gapm.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕНДА

Рассмотрено значение трендов для автоматического управления производственными процессами. На этой основе проанализированы некоторые методы их выявления. Разработан новый метод, успешно применённый для решения различных задач.

Ключевые слова: выделение трендов; гармонические тренды; линейные тренды; случайные процессы; спектральная характеристика; параметры тренда.

Value of trends for automatic control of production processes is considered. On this basis, some methods for their detection are analysed. A new method, successfully applied to solve various problems is developed.

Keywords: selection of trends; harmonic trends; linear trends; random processes; spectral characteristic; trend parameters.

Анализ трендов как инструмент автоматического исследования стабильности и эффективности производства и продукции широко применяется в различных сферах деятельности, в том числе в технике (например, в диагностике состояния оборудования, надёжности, бизнесе и других направлениях). При этом в основном используются следующие подходы и инструменты: спектральный анализ, сглаживание временного ряда, необходимого для выделения тренда, специальные методы, основанные на проверке статистических гипотез о случайности поведения функции на заданном временном отрезке, на подборе аппроксимирующей функции для конкретного участка визуально выделенного ряда [1].

Параметрические методы рассматривают временной ряд как гладкую функцию от времени. При этом сначала выявляют один либо несколько допустимых типов функций из содержательной сущности явлений. Затем различными методами, например, методом наименьших квадратов (МНК), оценивают параметры этих функций, после чего на основе проверки критериев адекватности выбирают окончательную модель тренда. В этом случае крайне редко выбирается нелинейная функция. Важное значение для практических приложений имеют линеаризованные тренды, т. е. тренды, приводимые к линейному виду относительно параметров путём использования тех или иных алгебраических преобразований.

При анализе случайных данных часто возникают ситуации [2, 3], когда требуется выяснить, являются ли наблюдения или оценки параметров статистически независимыми или же они подвержены тренду — монотонному изменению свойств или процессов. Особое значение эта задача приобретает при анализе нестационарных данных, в которых на фоне случайных изменений (в единичных измерениях) необходимо достоверно выделить наличие тенденции (тренд). Поскольку наблюдения или оценка параметров могут иметь самые разнообразные функции распределения, то удобно такие исследования проводить на основе свободных от заданных законов распределений методов, в которых относительно функции распределения исследуемых данных не делается никаких предположений, т. е. непараметрические методы. Это разные методы сглаживания исходного временного ряда [3, 4]: скользящие средние (простая, взвешенная) с различным формированием «окна сглаживания», экспоненциальное сглаживание, а также некоторые другие. Эти методы применяются как для оценки тренда, так и для прогнозирования развития случайного ряда, что является основой прогноза качества продукции и устойчивости работы оборудования. Они полезны в случае, когда для оценки тренда не удаётся подобрать подходящую функцию, а также, когда визуально нелегко выделить приблизительные интервалы наличия трендов (например, при использовании GUSUM-карт и существенном уровне шумов).

Сглаживание как метод выделения тренда всегда включает некоторый способ локального

усреднения данных, при котором несистематические компоненты взаимно погашают друг друга. Самый распространённый метод сглаживания — скользящее среднее, в котором каждый член ряда заменяется простым или взвешенным средним m соседних членов ряда, где $(2m + 1)$ — ширина «окна» сглаживания.

Рассмотрим отдельно основные проблемы при выделении наиболее распространённых периодических и линейных трендов.

Периодический тренд нередко оценивают для выявления источников периодических составляющих, вызывающих отклонения в свойствах процессов и изделий. Основные проблемы здесь возникают в случае сильного зашумления временного ряда. Хорошим инструментом анализа наличия периодических дрейфов и его параметров является спектральный анализ. Результат применения анализа — спектрограмма $S_x(\omega)$, характеризующая вклад гармонической составляющей на каждой из частот от нуля до бесконечности (или предельной частоты анализа).

Спектрограмма вычисляется по формуле

$$S_x(\omega) = 2\int_0^\infty R_x(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau,$$

где $R_x(\tau)$ — автокорреляционная функция, которая вычисляется с помощью выражения

$$R_x(\tau) = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T x(t)x(t+\tau)dt.$$

На рис. 1 в верхней части приведён исходный временной ряд, в котором визуально нельзя без специальных инструментов не только определить параметры гармонического тренда, но и предвидеть сам факт его присутствия. Модельный ряд из 500 точек сформирован как сумма гармонической составляющей с частотой 0,04 с единичной амплитудой и случайного центрированного шума, который сгенерирован по нормальному закону распределения. Ряд обладает среднеквадратичным отклонением (СКО) 1,986 и размахом 12,007 (максимальное значение 6,407, минимальное значение 5,600).

На нижней части рисунка приведены результаты применения спектрального анализа этого ряда. В нём чётко видно наличие периодической составляющей на указанной частоте (пик значительной амплитуды на спектрограмме на частоте 0,04), хотя визуально в исходном ряду его выделить невозможно. Амплитуда пика характеризует энергию колебаний на указанной частоте.

На рис. 2 в верхней части приведён временной ряд, «очищенный» от гармонической составляющей, с параметрами: СКО = 1,833, размах 11,559 (максимальное значение 6,412, минимальное значение 5,147). Увеличение максимального отклонения по сравнению с первым вариантом объясняется случайным алгебраическим сложением «в соответствующей временной точке» случайной величины со значением гармонической составляющей. Уменьшение СКО и размаха подтверждает отсутствие гармонической составляющей во временном ряде, т. е. они более точно оценивают случайную составляющую. При других значениях параметров составляющих временного ряда различие может быть другим.

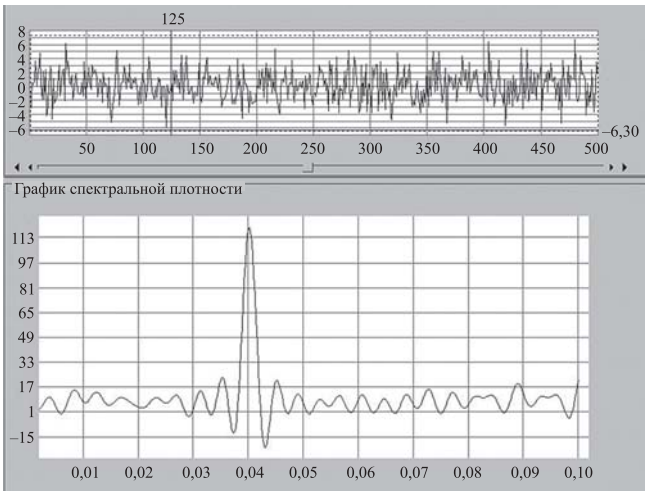

Рис. 1. Временной ряд и соответствующая спектрограмма

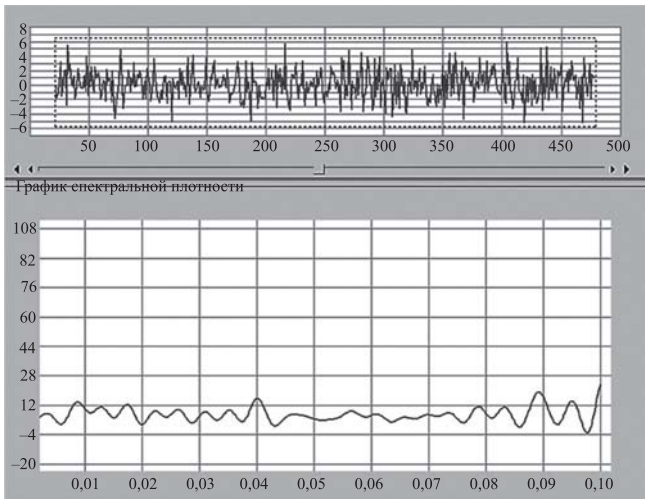

Рис. 2. Временной ряд, очищенный от гармонической составляющей, и соответствующая спектрограмма

Все вычисления проведены с использованием авторского программного обеспечения QStat Methods [4].

Проведя содержательный анализ исследуемого процесса, можно найти источник гармонической составляющей с выявленной частотой и устранить его, тем самым повысив стабильность процесса и снизив дисперсию переменной временного ряда. Наличие такого мощного инструмента для анализа периодических трендов позволяет решать практически все задачи этого класса.

Рассмотрим основные методы выделения линейных трендов и их особенности. Если временные ряды содержат значительную случайную составляющую, то для выделения тренда прежде всего необходимо провести подходящее сглаживание. Известно, что чем шире «окно сглаживания», тем меньше высокочастотная составляющая, тем больше может быть потеря данных в начале и конце ряда. При этом нередко теряется характер основного содержательного ряда [2, 3]. Поэтому разработать формальный алгоритм определения оптимального окна сглаживания практически невозможно, если не известны параметры случайного шума, что в действительности бывает почти всегда (их невозможно найти без предварительного удаления детерминированного дрейфа).

Следует также отметить, что во многих методах довольно трудно выделить тренд по мере накопления экспериментальных данных, так как к моменту анализа ряда необходимо иметь значительное число экспериментальных значений. Тренд может быть выделен на коротком интервале времени и не обнаружен на длительном, и наоборот.

Критерий серий и *критерий инверсий* дают два примера таких процедур, весьма полезных для установления статистической независимости и выявления тренда [1—4].

Сущность *метода серий* сводится к следующему. Рассматривается последовательность N экспериментальных значений временного ряда, причём каждое наблюдение может быть отнесено к одному из двух взаимно исключающих классов (например, анализируемое значение выше среднего значения «+» или ниже «−»). При этом находятся серии, т. е. последовательность повторяющихся исходов («+» или «−»). Случайность чередования таких серий (т. е. наличие тренда) определяется по специальному статистическому критерию функции распределения числа серий r [2].

В *методе инверсий* вычисляется, сколько раз во временном ряду имеет место неравенство $\omega_j > \omega_i$ при $j < i$, которое называется инверсией, и рассчитывается общее число инверсий $A = A_1 + A_2 + A_3 + ... + A_n$.

Если последовательность из N наблюдений состоит из независимых исходов одной и той же случайной величины, то число инверсий является случайной величиной, что также оценивается по специальному статистическому критерию [2].

В обоих методах необходимо анализировать на наличие тренда не только весь ряд, но и его отдельные участки, так как тренд может оказаться короче всего ряда. Детальные исследования метода серий и метода инверсий проведены с помощью программы QStat Methods [4]. В том числе изучено влияние характера тренда (непрерывный на анализируемом участке или кусочно-непрерывный), длины одного анализируемого тренда (на всем участке или на его части), вероятности выбора табличного значения критерия для сравнения с расчётным значением и некоторыми другими параметрами метода и условий его применения на результат выделения тренда.

Критерий инверсий является более точным (мощным) по сравнению с критерием серий при обнаружении монотонного тренда в последовательности наблюдений.

Очевидно, что к недостаткам обоих рассмотренных методов следует отнести то, что довольно трудно однозначно определить тип тренда — возрастающий или убывающий. Кроме того, нет надёжных подходов к определению начала и конца тренда. Как показывает краткий анализ применения таких методов, его результат часто бывает отрицательным («тренда нет»), когда анализируемый отрезок ряда, в котором пытаются выделить тренд, немного больше искомого тренда. Это важно во всех случаях, когда определение тренда производится не на всём отрезке ряда, а только на его части. Особенно это актуально, когда в одном ряду могут оказаться несколько возрастающих и убывающих трендов.

В указанных случаях методы серий и инверсий не справляются с поставленной задачей и требуется разработка специализированного метода.

Для решения поставленной задачи — выделения во временном ряду линейного тренда с определением его начала, конца и угла наклона — разработан новый метод, основанный на итерационной аппроксимации участка

ряда для оценки направления тренда (угла наклона к оси времени) с последующим прогнозом до его окончания.

В случае сильного зашумления временного ряда случайной составляющей целесообразно предварительно его сгладить. Однако испытания метода показали, что даже при сильной зашумлённости ряда направление тренда находится достаточно хорошо (недостатки проявляются лишь в определении начала и конца тренда). А при предварительном сглаживании скользящим средним с окном в 5...15 точек поставленная задача решается более успешно, к тому же для большинства возможных областей применения метода это не является значимым недостатком, так как ошибки не окажут влияния на последующие действия.

Исходными данными представляемого алгоритма являются:

N — количество значений параметра потока отказов в ряду;

w; t — исходный массив (всего N пар значений);

$N_а$ — длина отрезка, по которому строится аппроксимирующая функция для выделения каждого локального тренда;

e — доля СКО для выявления конца тренда, которая используется при сравнении со средней геометрической погрешностью прогноза по найденному локальному тренду (для получения более чётких результатов её можно подобрать под особенности конкретного временного ряда в диапазоне $0{,}1 \leqslant e \leqslant 2$).

Выделение тренда по разработанному алгоритму сводится к следующим шагам.

Шаг 1. С помощью процедуры аппроксимации на k-й итерации (при старте $k = 1$, затем счётчик итераций меняет это значение при каждом обращении на 1) по $N_а$ точкам находится линейная аппроксимирующая функция. Результат — a_k, b_k, $СКО_k$, где a и b — коэффициенты аппроксимирующего уравнения $\omega = a_k t + b_k$ на k-й итерации соответственно, $СКО_k$ — среднеквадратичное отклонение исходных и расчётных значений Y по линейной функции на k-й итерации.

Шаг 2. Нахождение окончания, выделенного на предыдущем шаге локального тренда.

2.1. Счётчик точек ряда, анализируемых на принадлежность к найденной функции тренда, принимает начальное значение $j = 1$.

2.2. По полученному уравнению $\omega = a_k t + b_k$ на k-й итерации вычисляется значение $w(t_{k+j})$, где t_{k+j} — следующая точка в исходном временном ряду, так как $j = 1$. Найденное значение $w(t_{k+j})$ принимается для простоты обозначений за Z_1. Далее вычисляется значение $w(t_{k+j+1})$ для следующей точки при t_{k+j+1}. Найденное значение $w(t_{k+j+1})$ принимается за Z_2.

2.3. Вычисляется невязка расчётных и реальных значений y:

$$S_{рр} = \sqrt{(Z_1 - \omega(t_{k+j}))(Z_2 - \omega(t_{k+j+1}))}.$$

Данная операция выполняется только для положительного значения подкоренного выражения. Это условие означает, что значения расчётных и экспериментальных точек находятся по одну сторону от линии тренда (первое условие возможного окончания анализируемого выделенного тренда). В случае отрицательного значения подкоренного выражения, что может быть только в том случае, когда последовательные две точки ряда находятся выше и ниже выделяемого тренда, переходим к следующей паре точек, увеличивая j на единицу, и возвращаемся к п. 2.2. Второе условие возможного окончания тренда формируется из соотношения величины $S_{рр}$ и доли $СКО_k$, определяемой как $eСКО_k$.

Если $S_{рр} \leqslant eСКО_k$, то это означает, что аппроксимирующая прямая примерно «приемлемо» (мерой приемлемости является e) подходит для описания следующих точек ряда, т. е. среднегеометрическое отклонение меньше заданной доли СКО. В этом случае осуществляется переход к такому же анализу следующих двух соседних точек исходного ряда $w(t_{k+j+1})$ и $w(t_{k+j+2})$, т. е. принимается $j = j + 1$ и осуществляется переход к п. 2.1. Далее рассчитываются значения Z_1 и Z_2 для следующих соседних точек ряда и осуществляется последовательный переход к п. 2.3.

Если $S_{рр} > eСКО_k$, то это означает, что отклонение расчётных по аппроксимирующей функции тренда значений от заданных значений ряда больше заданной доли $eСКО_k$ на предыдущем тренде. Выполнение рассмотренных двух условий принимается за начало нового тренда. В этом случае переменные a_k и b_k являются коэффициентами k-й линии тренда, а $N_a k + j$ даст следующую начальную точку нового тренда.

Для оценки возможности перехода к следующей итерации проанализируем достаточность количества точек в ряду для следующей аппроксимации точек исходного ряда. Если $N - (kN_a + j) < N_a$, то оставшихся точек не хватает для аппроксимации линии тренда.

В этом случае можно или прекратить дальнейшее выделение трендов и выйти из алгоритма с результатами k, a_k, b_k, $СКО_k$, или повторить весь алгоритм сначала с меньшим значением N_a, или получить последний тренд на оставшемся количестве точек, а именно $N_a = N - (kN_a + j)$. Тогда счётчик трендов увеличивается на единицу $k = k + 1$ и алгоритм переходит к шагу 1.

Если $N - (kN_a + j) \geqslant N_a$, то увеличиваем счётчик числа трендов $k = k + 1$ и переходим к шагу 1.

Настраиваемыми (корректируемыми) параметрами алгоритма являются: N_a — минимальная длина тренда, которая определяется из физической сущности задачи, и e — доля СКО, которая определяет «точность» конца тренда. Кроме того, при проведении предварительной операции сглаживания исходного ряда настраиваемым параметром может являться «окно сглаживания». Оно также определяется из содержательной части задачи. Все параметры необходимо подбирать из сущности задачи эвристически. Аналитически определить их однозначно нельзя из-за значительной случайной составляющей.

Учитывая, что в представленном методе есть неформально задаваемые настраиваемые параметры, влияющие на эффективность выделения тренда, проведены дополнительные исследования, позволяющие дать рекомендации по выбору этих параметров метода (количество точек для аппроксимации начального участка тренда N_a, доля СКО, которая определяет «точность» нахождения конца тренда e). Здесь важно оценить область эффективного применения метода, которая определяется амплитудой случайной составляющей шумов. Её можно характеризовать величиной дисперсии шума $D_{шума}$, а также целесообразностью и «глубиной» предварительного сглаживания, которую можно характеризовать шириной «окна сглаживания» временного ряда, существующего практически во всех методах скользящего усреднения данных. Очевидно, что на эффективность метода будет влиять и скорость изменения выявляемого тренда (угол наклона линии тренда к оси, характеризующий, например, последовательность экспериментальных данных), что также необходимо учесть.

Для проведения этих исследований были сформированы тестовые детерминированные ряды с возрастающими и убывающими трендами разного наклона, а также участками без тренда. Все составляющие этого ряда име-

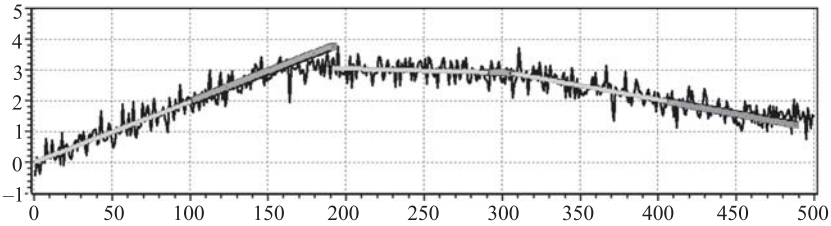

Рис. 3. Выявление трендов при N_a = 100 и $D_{шума}$ = 0,1

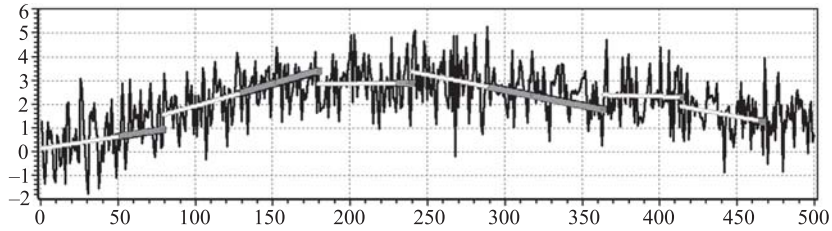

Рис. 4. Выявление трендов при N_a = 50 и $D_{шума}$ = 1,0

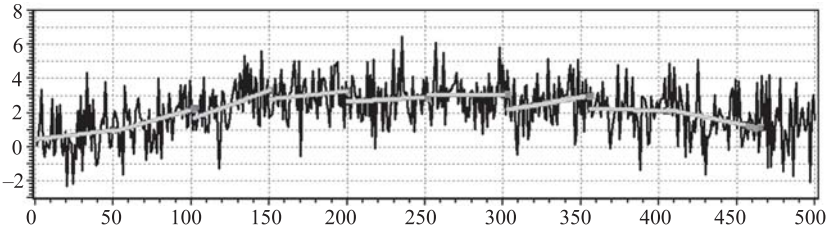

Рис. 5. Выявление трендов при e = 0,5 и $D_{шума}$ = 1,75

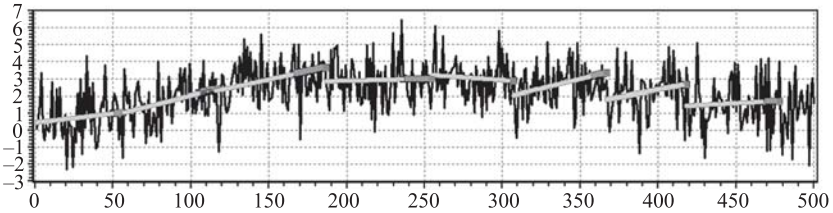

Рис. 6. Выявление трендов при e = 1,0 и $D_{шума}$ = 1,75

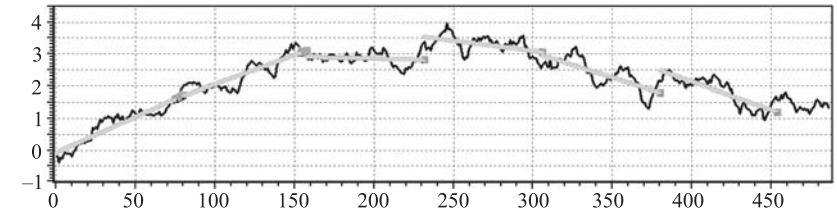

Рис. 7. Выявление трендов при e = 0,5, N_a = 75 и ширине окна сглаживания 13 для исходного ряда с $D_{шума}$= 1,75

ют продолжительность 150 единиц. На этот тренд в процессе исследования были «наложены» случайные составляющие с различными характеристиками.

На рис. 3—7 приведены некоторые основные результаты исследования метода выделения тренда в различных сочетаниях параметров метода N_a, e и случайного шума (задаваемого через $D_{шума}$).

Выводы и рекомендации:

при малом количестве точек аппроксимации N_a случайные выбросы искажают аппроксимирующую линию, при этом недостаточна наглядность выделения тренда;

при больших значениях N_a аппроксимирующая тренд линия наглядно повторяет исходный заданный тренд, при высоких помехах следует увеличивать параметр N_a;

чем больше количество точек N_a в заданной аппроксимирующей линии, тем выше точность аппроксимации тренда (тем меньше СКО) на выбранном участке, при малых значениях N_a возможен «захват» нескольких выбросов, которые существенно искажают выделение тренда и повышают СКО как меры близости аппроксимации тренда (из-за этого происходит неточное продление направления тренда);

при $D_{шума} < 0{,}5$ каждое исследуемое значение e даёт приемлемый результат;

при высоких дисперсиях ($D_{шума} > 1$) выделение приемлемо лишь при $0{,}5 \leqslant e \leqslant 1{,}5$;

при большем значении $D_{шума} \geqslant 1$ случайные выбросы влияют на продление аппроксимации и выделение тенденций (тренда) в целом, для высоких значений $D_{шума}$ следует увеличить количество N_a точек аппроксимации и e (если это не даст приемлемых результатов, то следует сгладить ряд);

при относительно небольшом значении $D_{шума} \leqslant 1$ изменение окна сглаживания не даёт эффекта;

при высоком значении $D_{шума} > 1$ сглаживание влияет на угол наклона аппроксимирующих линий вследствие «сглаживания» выбросов, для $D_{шума} > 2$ можно увеличить окно сглаживания, подбирая его в конкретных ситуациях.

При анализе влияния сглаживания в выбранном диапазоне варьирования ширины окна не удалось надёжно выявить изменчивость результатов моделирования. При всех окнах сглаживания (более 9 для 150 точек данных) получаются хорошие, практически неразличимые результаты. Поэтому приведён только один график.

В целом разработанный алгоритм надёжно позволяет решить задачу выделения любого количества линейных трендов с определением угла их наклона. Вследствие наличия эвристической составляющей в алгоритме, а также для оставления метода в классе непараметрических, невозможно дать статистическую характеристику (вероятность) точности выделения трендов и условий их стыковки.

Библиографические ссылки

1. **Васильков Ю.В., Иняц Н.** Статистические методы управления предприятием: доступно всем. М.: РИА «Стандарты и качество», 2008. 280 с.

2. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами / Под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. 958 с.

3. **Бендат Дж., Пирсол А.** Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

4. **Васильков Ю.В., Боровков А.В., Фуфин С.Ю.** QStat methods — Статистические методы в управлении качеством: электронный учебник по статметодам // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2008610646. 2008. 500 мб.

Ссылка для цитирования

Васильков Ю.В., Камакин А.Н., Сергеев И.А., Фролов П.А. Анализ методов выделения тренда // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 499—504.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений. Цены за публикацию умеренные.

УДК 658.562

Н.В. Бильфельд, канд. техн. наук, доц., **Ю.И. Володина,** канд. техн. наук, доц.
(Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета)

bilfeld@mail.ru, julia_volodina@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ КРИВОЙ РАЗГОНА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ИМПУЛЬСНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Рассмотрены основные проблемы исследования систем управления и получения кривых разгона с объектов управления в условиях производства. Показана проблема подачи на объект стандартного ступенчатого возмущающего воздействия на производстве. Приведён обзор решений этих проблем, описано получение кривой разгона по импульсной динамической характеристике вручную. Разработан способ автоматизированного расчёта кривой разгона в MS Excel путём использования формул, предложенных А.П. Копеловичем. Найдено решение данной задачи в MatLab с помощью функции вычисления неопределённого интеграла от сплайна в кусочно-полиномиальной форме. Проведено сравнение результатов, полученных разными методами. Сделан вывод о применимости и преимуществах предложенного метода в условиях производства.

Ключевые слова: производство; управление; идентификация; MatLab.

The main problems of control systems research and acceleration curves acquisition from control objects under production conditions are considered. The problem of supplying to object a standard stepped disturbing effect at the plant is shown. A review of these problems solutions is adduced; a manual acceleration curve acquisition for the impulse dynamic characteristic is described. A method for the automated calculation of the acceleration curve in MS Excel through the use of the formulas proposed by A.P. Kopelovich is developed. This problem solution in MatLab through the use of the function for calculating the indefinite integral of the spline in piecewise polynomial form is found. The comparison of results obtained by different methods is carried out. A conclusion is drawn on the applicability and advantages of the proposed method in a production conditions.

Keywords: production; control; identification; MatLab.

Введение. Для исследования систем управления, а именно, оптимизации настроечных параметров контуров управления, определения устойчивости и запаса устойчивости, проверки на наблюдаемость и управляемость, необходимо получить динамические характеристики каналов системы при реакции системы на единичный скачок. Величина скачка должна быть достаточно значительной. В большинстве методов идентификации систем используются такие динамические характеристики в качестве исходных данных.

В современных условиях технологический персонал всё реже соглашается на такие эксперименты из-за возможности нарушения технологического режима и ухудшения качества продукции. В этом случае в качестве возмущающего воздействия можно использовать единичный импульс, так как отклонения параметров от регламента минимальны. Практически это означает приоткрытие на короткое время исполнительного механизма и возвращение его в исходное положение. Здесь возникает вопрос о преобразовании импульсной динамической характеристики в характеристику от единичного скачка.

Цель данной статьи — рассмотреть практические методы этого преобразования и показать эволюцию данных методов с учётом использования современного программного обеспечения.

Метод ручного расчёта. Самый простой метод, с помощью которого можно преобразовать импульсную характеристику в обычную кривую разгона, предложил А.П. Копелович [1], который рассматривал импульсное возмущение как алгебраическую сумму двух равных скачкообразных возмущений.

Для этого импульсную характеристику (рис. 1) разбивают по времени на n равных участков t_1, t_2, t_3, каждый из которых равен продолжительности импульса tu. На участке t_1 ход импульсной кривой совпадает с обычной кривой разгона. На следующем участке t_2 ординаты импульсной кривой представляют собой разность ординат обычной кривой

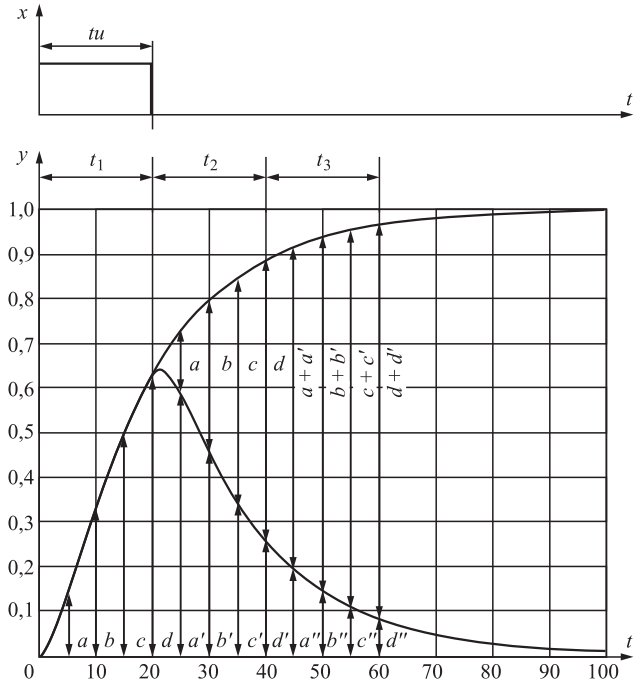

Рис. 1. Преобразование импульсной характеристики в обычную кривую разгона по методу А.П. Копеловича

разгона и соответствующих по времени ординат импульсной кривой на первом участке t_1 (так как новое возмущение по величине равно первоначальному, но направлено в противоположную сторону). Суммируя соответствующие ординаты первого и второго участков разбиения, можно получить искомые ординаты обычной кривой разгона для участка t_2, и так для всех последующих участков разбиения, пока не будет отмечено новое установившееся состояние.

Таким образом, если ординаты импульсной характеристики на участке t_1 обозначить последовательно a, b, c, d, ... (см. рис. 1), на участке t_2 соответственно — a', b', c', d'..., а на участке t_3 — a'', b'', c'', d''..., то ординаты обычной кривой разгона будут равны

на участке t_2 $a + a'$; $b + b'$; $c + c'$; $d + d'$,

на участке t_3 $a + a' + a''$; $b + b' + b''$; $c + c' + c''$; $d + d' + d''$; ...

Использование Excel. С появлением электронных таблиц процесс расчёта возможно автоматизировать. На рис. 2 показан фрагмент таблицы Excel.

В ячейку *F*3 помещаем формулу «=*C*3», в ячейку, соответствующую интервалу t_2 (см. рис. 1), — формулу «=*C*90 + *F*3» и т. д. (формулы можно размножить простым копированием). Формулы в ячейках аналогичны формулам, предложенными А.П. Копеловичем [1].

	A	B	C	D	E	F
1	Время, сек	Управл. сигнал	Значение пар-ра (имп. хар-			Значение пар-ра (кривая
2	0	0	0,0000			
3	1	1	0,0000	T1	1	0,0000
4	2	1	0,0000		2	0,0000
5	3	1	0,0000		3	0,0000
6	4	1	0,0000		4	0,0000
7	5	1	0,0000		5	0,0000
...						
90	88	0	0,3951	T2	1	0,3951
91	89	0	0,3990		2	0,3990
92	90	0	0,4027		3	0,4027
93	91	0	0,4065		4	0,4065

Рис. 2. Фрагмент таблицы Excel

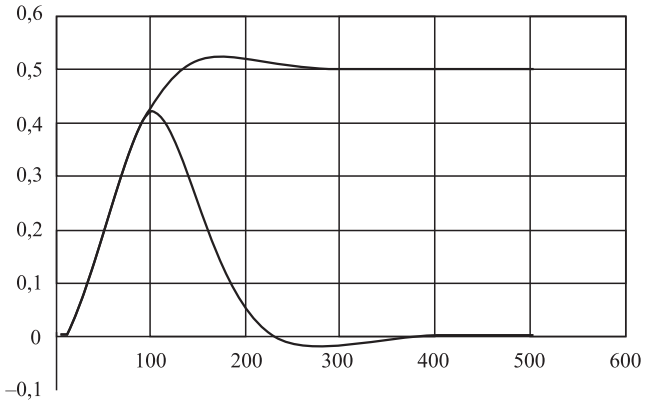

Рис. 3. Графики, полученные в таблице Excel

Процесс расчёта, таким образом, значительно ускорится. В результате получим графики, приведённые на рис. 3.

Можно ещё более упростить расчёт, написав программу на языке Basic Application, который поддерживают все офисные приложения. Листинг программы имеет следующий вид:

```
Sub impuls()
    N = Cells(1, 8) ‘Получаем количество точек
    ti = Cells(2, 8) ‘Получаем ширину импульса
    For i = 1 To N
        If i < = ti Then Cells(i, 5) = Cells(i, 3)
        If i > ti Then Cells(i, 5) = Cells(i, 3) + Cells(i — ti, 5)
    Next i
End Sub
```

Для тестирования программы, чтобы не вводить данные вручную и убедиться в правильности расчётов, разработана простейшая модель в MatLab, приведённая на рис. 4.

В блоке Scope 1 получаем массив реакции на импульс (im_out), а в блоке Scope 2 — массив реакции этого же объекта на скачок (st_out). Ширина импульса задаётся в блоке Step 2. Принцип настройки блоков приведён далее на рис. 8.

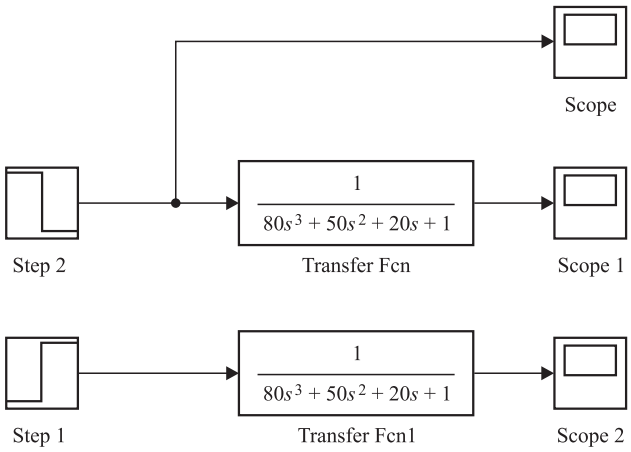

Рис. 4. Модель для тестирования программы

Для передачи данных в Excel используем следующий М-файл:

```
%Формируем массивы сигналов
L = length(im_in);
X = im_in(1:L,1:1);
Y1 = im_in(1:L,2:2);
Y2 = im_out(1:L,2:2);
Y3 = st_out(1:L,2:2);
%Передаем массивы в Excel
xlswrite('xl1.xls',X,'L1','A')
xlswrite('xl1.xls',Y1,'L1','B')
xlswrite('xl1.xls',Y2,'L1','C')
xlswrite('xl1.xls',Y3,'L1','D')
```

В результате выполнения М-файла Excel заполняется массивами, как показано на рис. 5.

При тестировании программы выяснилось, что в данном случае точность вычислений зависит от правильного ввода ширины импульса. В нашем случае время моделирования составляет 100 с, ширина импульса — 8 с, а количество точек массива — 1000. Следовательно, ширину импульса в ячейке H2 вводим равной 80.

В столбце D указан массив реакции от скачка, полученный экспериментально, а в столбце E — массив реакции от скачка, полученный расчётным путём. Из графиков на рис. 6 видно, что данные массивы совпадают.

Использование MatLab. Расчёты можно провести и непосредственно в MatLab, тогда отпадает проблема с вводом ширины импульса.

Необходимо отметить, что MatLab изначально был разработан для решения задач автоматизации. В данной среде расчёты ещё более упрощаются [3]. Для получения тестовых данных используем модель, приведённую на рис. 7.

Чтобы сформировать на входе единичный импульс, настроим блок Step 2 следующим образом. В поле step time установим значение,

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0,1	1	2,05E-06	2,05E-06	2,05E-06		Точек	1000
2	0,2	1	1,62E-05	1,62E-05	1,62E-05		Импульс	80
3	0,3	1	5,36E-05	5,36E-05	5,36E-05			
4	0,4	1	0,000125	0,000125	0,000125			
5	0,5	1	0,000241	0,000241	0,000241			

Рис. 5. Фрагмент таблицы Excel после выполнения М-файла

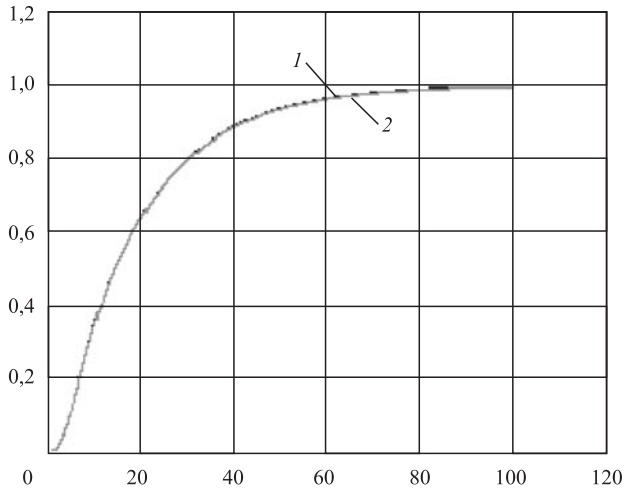

Рис. 6. Совпадающие массивы, полученные экспериментально (ряд 1) и расчётным путём (ряд 2)

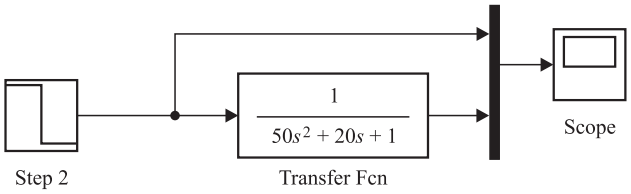

Рис. 7. Модель для тестирования

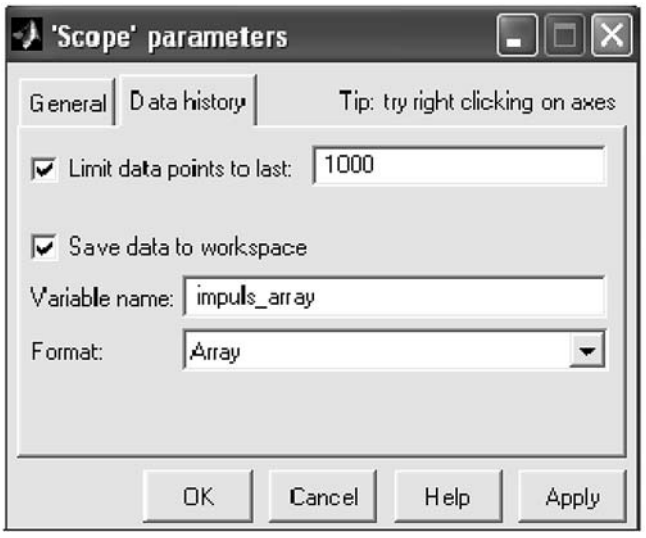

Рис. 8. Настройка блока Scope

равное 5 (это будет ширина импульса). В поле Initial установим значение, равное 1, а в поле Final value установим значение, равное 0.

Теперь необходимо соответствующим образом настроить блок Scope (рис. 8), чтобы получить массив выходного сигнала в среду MatLab.

Напишем небольшую программу, приведённую ниже:

```
time = impuls_array(:,1)    % Время моделирования
impuls = impuls_array(:,2)% Значение импульса (0-нет, >0-есть)
pv = impuls_array(:,3)      % Значение параметра регулирования
len = length(impuls_array)  % длина массива
% Создаем нулевой массив для новых значений кривой разгона
ReImpuls = zeros(len,1)
widthImp = 0                % Ширина импульса
for i = 1:len
    if impuls(i)>0
        widthImp = widthImp + 1 % Определяем ширину импульса
        ReImpuls(i) = pv(i) % Пока действует импульс, графики
                              совпадают
    end
    % Если импульс = 0 и ширина импульса больше 10 секунд
    if impuls(i) = = 0 & widthImp>9
        % Перестройка импульсной характеристики в кривую
        разгона
        ReImpuls(i) = pv(i) + ReImpuls(i-widthImp)
    end
end
grid on
hold on
plot(time,impuls,'r')       % Импульс
plot(time,pv,'b')           % Импульсная характеристика
plot(time,ReImpuls,'m')     % Кривая разгона
```

Программа реализует ранее приведённый алгоритм. В результате получим графики, приведённые на рис. 9.

Использование Spline Tool. В MatLab имеется специальная библиотека Spline Tool [2]. Библиотека позволяет строить приближения с помощью интерполяционных кубических сплайнов с различными граничными условиями. Она насчитывает более 50 различных функций, позволяющих производить ряд операций с полученными приближениями (вычислять значения в заданных точках, дифференцировать, интегрировать, проводить экстраполяцию).

Исследуя данные функции [2], авторы стремились на каждую функцию привести соответствующий пример, поясняющий работу функции. При рассмотрении функции интегрирования структуры сплайна (fnint) результат оказался следующим:

```
clc;
X = [0:1:14]'; Y = [0;1;1;3;3;4;6;6;7;5;3;3;2;1;0];
plot(X,Y,'o');
PP = csapi(X,Y);
PP1 = fnint(PP)
hold on; fnplt(PP); fnplt(PP1,'r',2);
grid on
```

Возьмём случайные исходные данные *X*, *Y* и с помощью функции csapi сформируем структуру кубического сплайна, которая имеет следующий вид:

```
PP = form: 'pp'
    breaks: [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14]
    coefs: [14x4 double]
    pieces: 14
    order: 4
    dim: 1
```

Далее проинтегрируем полученную структуру функцией fnint, которая вычисляет неопределённый интеграл от сплайна в кусочно-полиномиальной форме или *B*-форме. В заключение, с помощью функции fnplt построим график полученной структуры (рис. 10).

Исходные данные примера очень похожи на импульсную характеристику, а результат — на кривую разгона от единичного скачка. Проверим, нельзя ли таким образом осуществлять

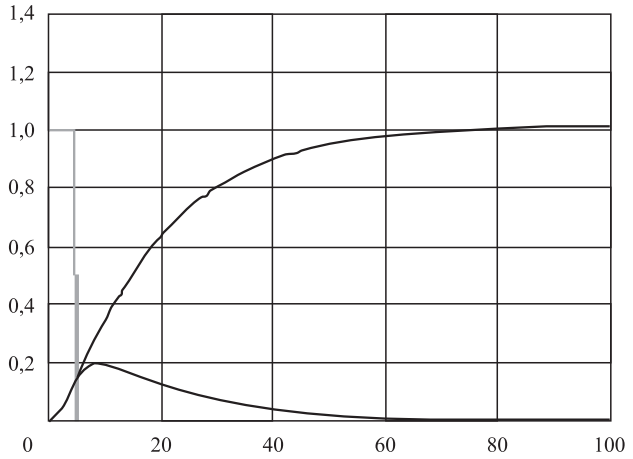

Рис. 9. Графики, полученные в MatLab

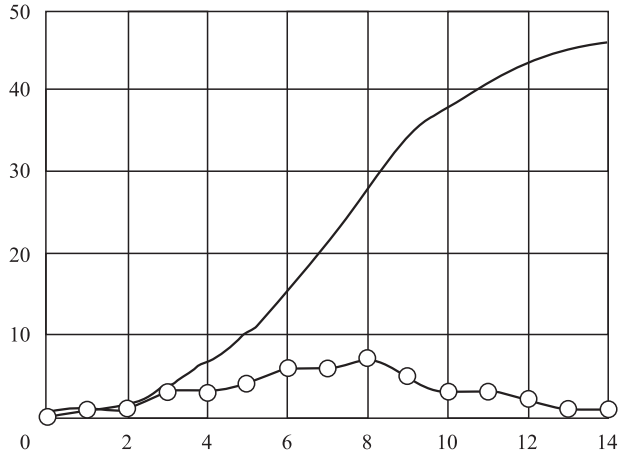

Рис. 10. Результат работы функции fnint

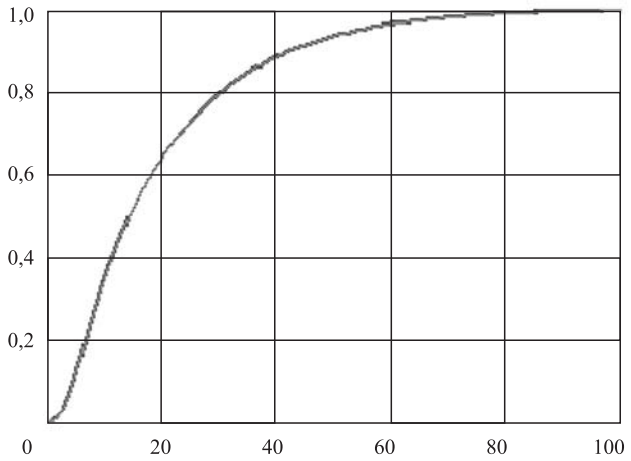

Рис. 11. Результат предложенного метода

преобразование импульсных характеристик. После проверки предположения авторов полностью подтвердились. Ниже приведён пример, доказывающий это предположение:

```
clc
% объявляем объект в виде передаточной функции
W = tf([1],[80 50 20 1]);
% формируем массивы реакции от скачка
[Y1,X1] = step(W)
% формируем массивы реакции от импульса
[Y,X] = impulse(W)
% Преобразуем массивы в реакцию от скачка
P = csapi(X,Y); P1 = fnint(P);
% строим исходный и полученный графики
hold on; plot(X1,Y1,'LineWidth', 2); fnplt(P1,'r',1);
grid on
```

В результате получаем совпадающие графики, приведённые на рис. 11, что доказывает работоспособность предложенного метода.

Оказывается, что для преобразования импульсной характеристики в характеристику от единичного скачка достаточно всего двух команд:

```
P = csapi(X,Y); P1 = fnint(P);
```

Здесь важно отметить, что при подаче на объект единичного импульса его длительность должна составлять 1 с (это несложно реализовать с помощью современных микропроцессорных контроллеров).

Вывод. Предложенный метод в последнее время успешно используется для исследования динамики объектов управления при наладке систем автоматизации. Исходные данные в среду MatLab получены непосредственно с контроллера через OPC-сервер, а нанесение на объект короткого импульса с того же контроллера практически не влияет на технологический режим.

Учитывая максимальную простоту и быстродействие метода, его можно рекомендовать для исследования динамических свойств объектов управления.

Библиографические ссылки

1. **Копелович А.П.** Инженерные методы расчёта при выборе автоматических регуляторов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по чёрной и цветной металлургии, 1960. 189 с.

2. **Бильфельд Н.В., Володина Ю.И.** Обработка динамических характеристик в пакете Spline Toolbox. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. 66 с.

3. **Бильфельд Н.В., Измайлова Е.В.** Программирование в MatLab. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. 235 с.

4. **Затонский А.В.** Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: ИНФРА-М, ИЦ РИОР, 2013. 136 с.

Ссылка для цитирования

Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Формирование кривой разгона объекта управления по импульсной динамической характеристике // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 505—509.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,
можно найти на сайте
www.mashin.ru

УДК 681.5

А.Б. Чернышев, д-р техн. наук, доц.
(Институт сервиса, туризма и дизайна
Северо-Кавказского федерального университета (филиал), г. Пятигорск),
М.С. Назарцев
(Лермонтовский региональный многопрофильный колледж),
З.Р. Майрансаев
(Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), г. Владикавказ)
chalbor@rambler.ru

АНАЛИЗ АВТОКОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Сформулирован алгоритм Гольдфарба, обобщённый для систем с распределёнными параметрами. Рассмотрен пример анализа автоколебаний распределённой системы с релейным элементом. Проведён анализ взаимного расположения годографов линейной части системы и обратной характеристики нелинейного элемента для распределённой системы, содержащей звено с петлёй гистерезиса.

Ключевые слова: гармоническая линеаризация; автоколебания; амплитуда; частота; распределённые системы; нелинейный элемент.

The Goldfarb algorithm, generalized for systems with distributed parameters is stated. An example of the self-oscillations analysis for a distributed system with a relay element is considered. The analysis of the hodographs relative position for the linear part of the system and the inverse characteristic of the nonlinear element for a distributed system containing a link with a hysteresis loop was carried out.

Keywords: harmonic linearization; self-oscillations; amplitude; frequency; distributed systems; nonlinear element.

Управляемые величины распределённых систем выражаются функциями нескольких переменных. Аргументами таких функций являются время и пространственные координаты. Математическая модель, описывающая функционирование распределённой системы, представляется дифференциальными уравнениями в частных производных [1, 2]. В процессе исследования нелинейных автоматических систем в качестве одной из основных задач решается задача поиска возможных состояний равновесия исследуемой системы. Важнейшими задачами являются также исследование устойчивости таких систем, определение наличия периодических колебаний. Автоколебательные системы успешно применяются для поддержания различных параметров физических процессов, например температуры, если амплитуда и частота колебаний находятся в допустимых пределах [3]. Одним из самых распространённых методов исследования автоколебаний систем с сосредоточенными параметрами является метод гармонической линеаризации. При решении задач анализа автоколебаний, т. е. определения наличия автоколебаний и при их наличии нахождения частоты и амплитуды, соответствующих устойчивым автоколебаниям, для систем с сосредоточенными параметрами используется графоаналитическая схема, предложенная Гольдфарбом [4]. Актуальность предлагаемого в статье исследования обусловлена отсутствием чёткой теории анализа автоколебательных режимов систем с распределёнными параметрами.

Сформулируем алгоритм Гольдфарба, обобщённый для распределённых систем.

Построить годограф комплексной передаточной функции линейной части системы при изменении частоты $0 \leqslant \omega < \infty$ для каждого независимого контура n, т. е. передаточной функции вида

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \bar{y}) + \exp(-\beta_n \bar{y})}{\exp(\beta_n l_y) + \exp(-\beta_n l_y)},$$

где $\beta_n = \left(\frac{s}{a_t} + \psi_n^2\right)^{1/2}$; $s = j\omega$; $\psi_n = \frac{\pi n}{l_x}$; $n = \overline{1,\infty}$; l_x, l_y, $\bar{y}$ — геометрические параметры физического объекта; a_t — постоянный коэффициент; j — мнимая единица.

Построить годограф обратной характеристики эквивалентного распределённого ли-

нейного звена, заменяющего нелинейный элемент, при изменении амплитуды $0 < a < \infty$

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1}+\frac{1}{n_1}G\right][q(a)+jq_1(a)]},$$

где $G = \psi_n^2 = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2$ — значение обобщённой координаты; $M_H(a, G)$ — обратная характеристика эквивалентного распределённого линейного звена; E — общий коэффициент усиления распределённого звена; n_1 — весовой коэффициент; $q(a)$, $q_1(a)$ — коэффициенты гармонической линеаризации характеристики эквивалентного распределённого линейного звена $W_H(a,G)$, заменяющего нелинейный элемент.

Найти значения частоты ω_p и амплитуды a_p периодического движения, соответствующие точкам пересечения годографов $W_n(j\omega)$ и $M_H(a,G)$, решив уравнение гармонического баланса

$$W_H(a, G)W(j\omega) = -1.$$

Графическая интерпретация метода Гольдфарба: если при движении по годографу

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{W_H(a,G)}$$

при увеличении амплитуды a от значения a_p оказываемся в точке, которая не охватывается годографом $W_n(j\omega)$, то амплитуде a_p соответствуют устойчивые колебания, если оказываемся в точке, которая охватывается годографом $W_n(j\omega)$, то амплитуде a_p соответствуют неустойчивые колебания.

Рассмотрим анализ автоколебаний на примере процесса распространения тепла на отрезке конечных размеров $x \in [0, l]$. Математическая модель объекта (линейной части системы) описывается уравнением [5, 6]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a_t \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \; 0 < x < l,$$

где $T(x, t)$ — фазовая переменная; x — пространственная координата; a_t — заданный коэффициент температуропроводности; l — заданное число, определяющее длину отрезка.

Граничные и начальные условия имеют вид

$$T(0, t) = 0; \; T(l, t) = U(t); \; T(x, 0) = 0.$$

Функцией выхода является значение температуры $T(x_H, t)$, где x_H — заданное число ($0 < x_H < l$), координата точки наблюдения. Передаточная функция объекта по n-й моде входного воздействия имеет вид [7]

$$W_n(s) = \frac{\exp[\beta_n x_H] + \exp[-\beta_n x_H]}{\exp[\beta_n l] + \exp[-\beta_n l]};$$

$$\beta_n = \left(\frac{s}{a_t} + \psi_n^2\right)^{1/2}; \; \psi_n = \frac{\pi n}{l}; \; n = \overline{1,\infty}.$$

Для частотного анализа положим $s = j\omega$. При изменении частоты ω от 0 до ∞ функция $W_n(j\omega)$ опишет годограф для каждой пространственной моды. Пусть нелинейное звено реализовано в виде релейного элемента, для которого коэффициенты гармонической линеаризации

$$q(a) = \frac{4S}{\pi a}; \; q_1(a) = 0.$$

Примем значение высоты порога релейного элемента $S = 1$. Обратная характеристика эквивалентного распределённого линейного звена, заменяющего нелинейный элемент, при заданных коэффициентах E, n_1, геометрическом параметре l и номере пространственной моды n будет зависеть только от амплитуды a:

$$M_H(a) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1}+\frac{1}{n_1}\left(\frac{\pi n}{l}\right)^2\right]\frac{4}{\pi a}}.$$

При изменении амплитуды от 0 до ∞ обратная характеристика $M_H(a)$ опишет годограф для каждой пространственной моды. Исследование нескольких пространственных мод позволит проводить анализ автоколебаний нелинейных систем рассматриваемого класса.

Рассмотрим объект управления при следующих заданных параметрах: длина стержня $l = 0{,}5$ м; координата точки наблюдения $x_H = l/2$; коэффициент температуропроводности материала стержня $a_t = 0{,}0044$. При данных значениях параметров обратная характеристика эквивалентного звена примет вид

$$M_H(a) = -\frac{1}{\left(\frac{\pi}{0{,}5}\right)^2 \frac{4}{\pi a}} = -\frac{a}{16\pi}.$$

При $M_H(a) = -0{,}03$, получим

$$-\frac{a}{16\pi} = -0{,}03; \; a_p = 0{,}48\pi.$$

При $\mathrm{Re}[W(j\omega)] = -0{,}03$ частота $\omega_p = 1{,}55$.

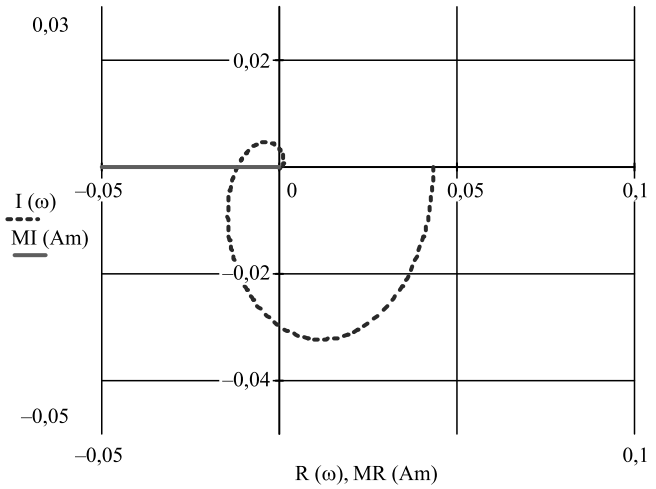

Рис. 1. Диаграмма Гольдфарба для первой пространственной моды (n = 1, n_1 = 1)

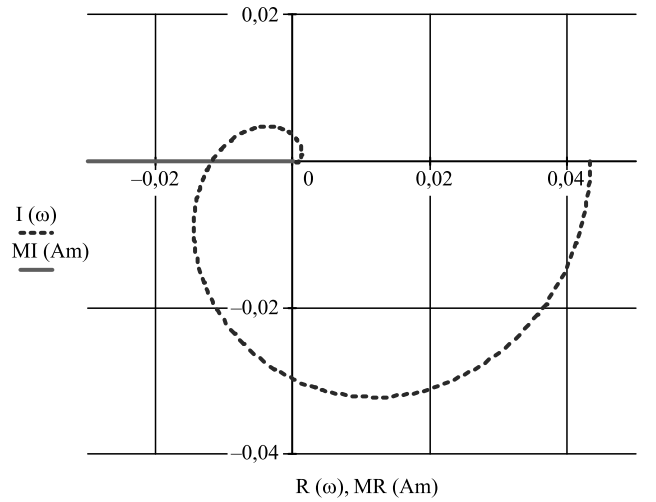

Рис. 2. Диаграмма Гольдфарба для второй пространственной моды (n = 2, n_1 = 1)

По диаграмме Гольдфарба (рис. 1)* определяем, что полученным значениям амплитуды $a_p = 0{,}48\pi = 1{,}51$ и частоты $\omega_p = 1{,}55$ соответствуют устойчивые колебания, так как при увеличении амплитуды свыше a_p точка, движущаяся по годографу $M_H(a)$, не охватывается годографом $W_1(j\omega)$.

При значении $\mathrm{Re}[W(j\omega)] = \mathrm{Re}[M_H(a)] = -0{,}012$ (рис. 2) амплитуда и частота принимают следующие значения: $\omega_p = 1{,}12$; $a_p = 2{,}35$. В данном случае точка пресечения годографов определена графически. При необходимости определения её более точного значения уравнение гармонического баланса можно решить аналитически, приравнивая действительные и мнимые части передаточных функций. По диаграмме, приведённой на рис. 2, определяем, что полученным значениям амплитуды и частоты соответствуют устойчивые колебания. В рассматриваемой системе с релейным элементом всегда будет существовать устойчивый автоколебательный режим. Параметры автоколебаний можно определить для любой пространственной моды.

Рассмотрим систему со всеми значениями физических параметров и передаточной функцией из предыдущего примера. Пусть нелинейное звено системы представляет собой элемент с петлей гистерезиса (рис. 3). Коэффициенты гармонической линеаризации такого элемента определяются соотношениями

$$q(a) = \frac{4S}{\pi a}\sqrt{1-\frac{b^2}{a^2}};\ q_1(a) = -\frac{4Sb}{\pi a^2};\ a \geqslant b;$$
$$q(a) = 0;\ q_1(a) = 0;\ a < b.$$

Обратная характеристика эквивалентного звена имеет вид

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1}+\frac{1}{n_1}G\right][q(a)+jq_1(a)]};$$

$$G = \psi_n^2 = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2.$$

С учётом коэффициентов гармонической линеаризации элемента с петлей гистерезиса обратная характеристика примет вид

$$M_H(a) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1}+\frac{1}{n_1}\left(\frac{\pi n}{l}\right)^2\right]\left(\frac{4S}{\pi a}\sqrt{1-\frac{b^2}{a^2}}-j\frac{4Sb}{\pi a^2}\right)}.$$

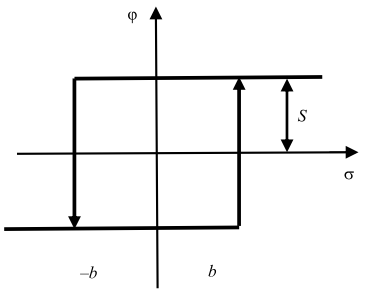

Рис. 3. Элемент с петлей гистерезиса:
σ — входной сигнал нелинейного элемента; φ — значение на выходе нелинейного элемента

*На графиках, изображающих годографы, по оси абсцисс откладываются действительные составляющие (Re) характеристик $W_n(j\omega)$ и $M_H(a)$ — на графиках R(ω) и MR(Am) соответственно; по оси ординат — их мнимые (Im) составляющие. В программе системы Mathcad, при помощи которой построены графики, характеристика $W_n(j\omega)$ обозначена $l(\omega)$, $M_H(a)$ обозначена M1(Am).

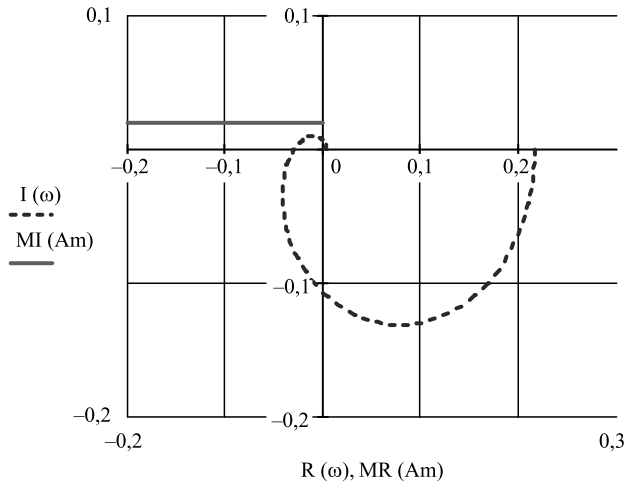

Рис. 4. Диаграмма Гольдфарба для значений n = 1, n_1 = 1, b = 1

Рассмотрим взаимное расположение годографов передаточной функции линейной части системы и обратной характеристики эквивалентного элемента в зависимости от номера пространственной моды n, весового коэффициента n_1 и ширины петли гистерезиса b. На рис. 4 представлена диаграмма Гольдфарба для первой моды при фиксированных значениях весового коэффициента и ширины петли гистерезиса, а на рис. 5 — диаграммы для второй и пятой мод при фиксированных значениях весового коэффициента и ширины петли гистерезиса. Эти диаграммы показывают, что при неизменных значениях весового коэффициента и ширины петли гистерезиса взаимное расположение годографов зависит от номера пространственной моды.

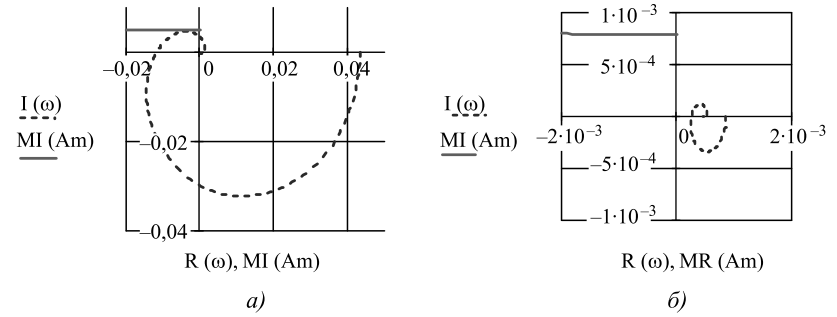

Рис. 5. Диаграммы для значений n = 2 (*а*) и n = 5 (*б*), при n_1 = 1, b = 1

Зафиксируем значение пространственной моды: $n = 1$ и ширины петли гистерезиса: $b = 1$, будем изменять весовой коэффициент. Диаграммы, приведённые на рис. 6, показывают, что при неизменных значениях номера пространственной моды и ширины петли гистерезиса взаимное расположение годографов зависит от значений весового коэффициента. Анализ приведённых диаграмм показывает, что для рассмотренных значений пространственных мод и весовых коэффициентов режим автоколебаний в системе не наступает. Изменим ширину петли гистерезиса при фиксированных значениях моды и весового коэффициента.

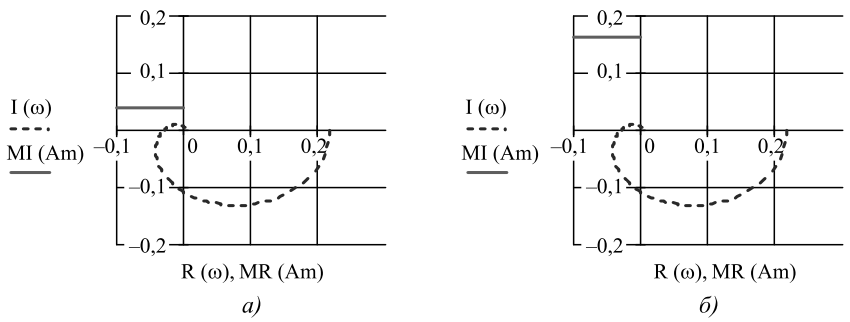

Рис. 6. Диаграммы для n_1 = 2 (*а*) и n_1 = 10 (*б*) при n = 1, b = 1

Диаграммы, приведённые на рис. 7, показывают, что при неизменных значениях номера пространственной моды n и весового коэффициента n_1 взаимное расположение годографов зависит от значения ширины петли гистерезиса b. Анализ приведенных на рис. 4—7 диаграмм показывает, что для рассмотренных номеров пространственных мод, весовых коэффициентов и ширины петли гистерезиса режим автоколебаний в системе наступает начиная с некоторых значений ширины петли гистерезиса нелинейного элемента.

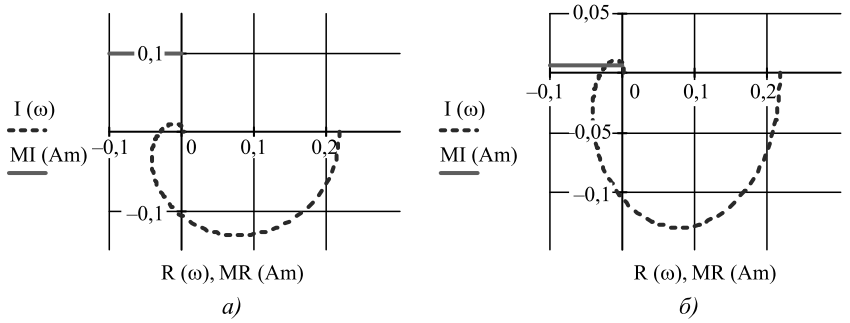

Рис. 7. Диаграммы для b = 5 (*а*) и b = 0,3 (*б*) при n = 1, n_1 = 1

Заключение. Выявлена зависимость взаимного расположения годографов, а следовательно, и возможность автоколебаний, а также

устойчивости автоколебаний от параметров передаточных функций распределённых звеньев системы и параметров нелинейной характеристики. На основе теоретических разработок получен метод, позволяющий проводить анализ автоколебательных режимов распределённых систем автоматического управления.

Библиографические ссылки

1. **Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Ильюшин Ю.В.** Моделирование релейно-импульсных распределённых систем. Пятигорск: Изд-во ПГГТУ, 2012. 248 с.

2. **Martirosyan A.A., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B.** Methods of distributed system's structured modelling // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016. EIConRusNW). P. 283—289.

3. **Ланда П.С.** Автоколебания в распределённых системах. М.: Либроком, 2010. 320 с.

4. **Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х.** и др. Теория автоматического управления. Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высш. шк., 2003. 567 с.

5. **Чернышев А.Б.** Исследование абсолютной устойчивости нелинейных распределённых систем // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 4. С. 21—26.

6. **Чернышев А.Б., Кравцова А.Л., Соха Е.Ю.** Анализ устойчивости процесса стабилизации температурного поля нелинейной распределённой системы // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 9. С. 16—21.

7. **Чернышев А.Б.** Обобщение методов анализа устойчивости для распределённых систем // Современная наука и инновации. 2015. № 3 (11). С. 16—22.

Ссылка для цитирования

Чернышев А.Б., Назарцев М.С., Майрансаев З.Р. Анализ автоколебаний систем с распределёнными параметрами // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 510—514.

УДК 65.018.2

М.А. Назаренко, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Российский технологический университет)

nazarenko@mirea.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА МОБИЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проанализированы понятие качества мобильных операционных систем, а также их технические параметры. Представлена система управления качеством, включающая концепцию всеобщего управления качеством TQM (англ. Total Quality Management) и улучшение технических параметров, с учётом спрогнозированной динамики будущих изменений.

Ключевые слова: мобильная операционная система; менеджмент качества; система; управление; качество; кластерный анализ.

The concept of mobile operating systems quality, as well as their technical parameters, is analyzed. A quality management system including the concept of total quality management TQM (Total Quality Management) and the improvement of technical parameters, taking into account the predicted dynamics of future changes is presented.

Keywords: mobile operating systems; quality management; system; management; quality; cluster analysis.

Введение. В ходе исследования выявлено, что представление о качественной мобильной операционной системе существенно меняется со временем. В настоящее время можно выделить пять устойчивых представлений о качественных мобильных операционных системах, существовавших в разное время. На данный момент система менеджмента качества мобильных операционных систем сводится к реализации концепции всеобщего управления качеством TQM. В основных компаниях-производителях Google (США) и Apple данные концепции реализуются с упором на работу с персоналом, его развитие и повышение качества продукта.

В области технического качества мобильных информационных систем и его ключевых параметров существуют аналитические обзоры авторитетных изданий, включая Habr (Россия), а также множественные работы, по-

священные сравнению отдельно взятых параметров. При этом понятие качества мобильной операционной системы не определено. Также отсутствует система управления качеством мобильных операционных систем, основанная на развитии указанного понятия и его технического содержания.

В статье представлены краткие результаты анализа качества мобильных операционных систем на основе кластерного анализа и оценки состоятельности данных на основе метода альфа Кронбаха. Отметим, что для формирования модели качества в зависимости от технических параметров также использовалась логистическая регрессионная модель, что не привело к содержательным результатам. В связи с этим результаты расчётов в статье не приводятся.

Основная часть. В результате изучения данных из различных источников об отдельных параметрах мобильных операционных систем и их сопоставления сформирован список ключевых параметров, который включает [2—5]:

скорость отклика на стандартную операцию;

объём оперативной памяти, занимаемой операционной системой;

простоту связи с другими устройствами;

допустимость кастомизации системы или отдельных её компонентов;

скорость работы буфера обмена;

скорость адаптации к новым технологиям за пределами мобильной операционной системы;

удобство доступа к файлам (количество кликов);

соответствие оценок приложений в магазине их фактическому качеству;

возможность установки сторонних приложений;

доля операций, которые возможно осуществить с помощью голосового помощника;

интуитивную понятность для пользователя, которая определяется временем, необходимым пользователю для того, чтобы разобраться с системой и её ключевыми функциями (данный показатель существенно снижается, если в операционную систему встроено обучение основам её функционирования и ключевым жестам);

тип ядра — загрузка части операционной системы (гибридное ядро), загрузка полной операционной системы (монолитное ядро);

поддерживаемые архитектуры процессора и возможность быстро адаптироваться к новому аппаратному обеспечению;

надёжность — свойство системы сохранять во времени способность выполнять требуемые функции;

отказоустойчивость — свойство технической системы сохранять способность правильно функционировать после отказа всей системы или отдельных её частей;

удобство обновления мобильной операционной системы.

В модели для абсолютных значений было выявлено пять кластеров, каждый из которых отражает разные представления о качестве мобильных операционных систем (таблица).

Все значения теста альфа Кромбаха для приведённых в таблице значений выше 0,7, что свидетельствует о высокой согласованности показателей.

Структура системы менеджмента качества мобильных операционных систем и встроенных приложений, основанная с учётом приведённого кластерного анализа, представляет собой сложную многоуровневую систему, верхним определяющим элементом которой является стратегическое планирование развития технологий. Данный элемент является определяющим для всех подчинённых ему

Центры кластеров качества мобильной операционной системы для модели в абсолютных значениях

Критерии	Кластер				
	1	2	3	4	5
Response	66,50	89,80	28,14	13,25	53,90
RAM	623,00	282,00	1291,4	2125,0	933,81
Devices	0,70	0,00	0,21	1,00	0,33
Castom	0,00	0,00	0,21	1,00	0,24
Bufer	56,60	64,00	19,50	13,25	34,24
Tech	6,80	8,60	5,57	9,50	7,10
Files	4,00	4,00	3,79	3,00	3,76
Apps	7,50	7,80	6,64	6,75	5,57
Otherapps	0,70	0,00	0,21	1,00	0,33
Assist	0,00	0,00	3,93	6,75	1,52
Interface	6,20	8,60	6,57	7,00	7,43
Kernel	0,70	0,00	0,21	1,00	0,33
CPU	0,70	0,00	0,21	1,00	0,33
Reliability	4,10	5,40	6,29	7,50	6,14
Fault	4,30	5,60	5,64	8,00	6,43
Update	0,30	1,00	1,00	1,00	0,90

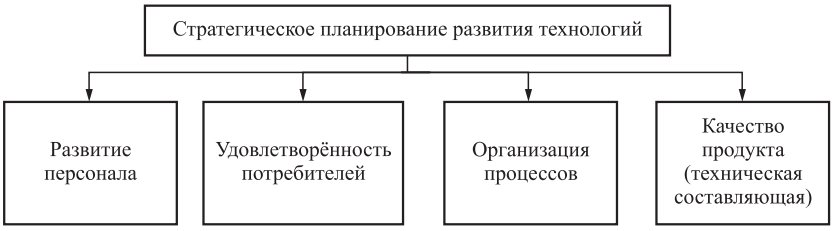

Рис. 1. Структура системы менеджмента качества мобильных операционных систем и встроенных приложений

структур и систем. Три из подчинённых систем соответствуют общей модели TQM с учётом специфики, выявленной ранее для реализации проектов создания и развития информационных систем. Четвёртая система объединяет в себе критерии, сформулированные в данной работе в контексте технического качества мобильных операционных систем (рис. 1).

Каждый из элементов нижнего уровня раскрывается различным образом. В частности, развитие персонала тесно связано с его удовлетворённостью от работы и создания инноваций, что во многом определяется стратегическим планированием инноваций и технической характеристикой — скоростью выхода обновлений мобильной операционной системы. Отметим, что такие обновления не могут быть слишком медленными, так как персонал должен быть вовлечён в процесс создания инноваций. Одновременно они не могут быть и слишком интенсивными, чтобы не перегружать персонал, а также давать пользователям возможность адаптироваться к нововведениям.

Удовлетворённость потребителей не определяется набором тех или иных качеств или свойств системы, как это предполагалось ранее. Более того, сами представления о качестве адаптивны ко времени и общему развитию мобильных технологий. В связи с этим компаниям, создающим мобильные операционные системы, необходимо сосредоточиться на формировании предпочтений потребителей, а не подстраиваться под них. Кроме того, предпочтения потребителей существенно зависят от культуры использования информационных систем и продуктов. Именно культуру потребления и использования, определяющую фактические предпочтения пользователей, необходимо формировать и развивать в нужном векторе.

Организация процессов в подходе, согласующемся с концепцией TQM, представляет собой интеграцию стратегического видения компании в области развития технологий, а также развитие предпочтений потребителей с учётом деятельности конкурентов и развития смежных продуктов. Ключевыми характеристиками данного процесса являются изменчивость во времени и изменение понятия качества.

Техническое качество продукта формируется из нескольких ключевых категорий:

расширения сторонних возможностей использования мобильной операционной системы, что подразумевает создание и развитие экосистемы, расширение возможностей интеграции с устройствами сторонних производителей, возможность установки сторонних приложений, развитие возможностей голосового помощника во внешних коммуникациях, адаптивность к инновациям сторонних производителей;

расширения внутренних возможностей использования кастомизации, развития голосового помощника, обеспечивающего взаимодействие пользователя и мобильной системы, разделение экрана, улучшение многозадачности;

системных изменений — адаптивность к разным типам процессоров (с минимизацией влияния на скорость работы, надёжность, отказоустойчивость), своевременные обновления (влияющие на качество остальных процессов), повышение скорости отклика (незначительное), повышение отказоустойчивости и надёжности, упрощение доступа к пользовательским файлам, улучшение их систематизации;

развития встроенных приложений — система хранения, систематизации и доступа к пользовательским файлам, которая может быть реализована по принципу проводника, открывающегося непосредственно в пользовательской папке, в то время как доступ к файлам и папкам верхнего уровня реализуется с помощью функции «домой» или «вверх».

Отметим, что не все технические критерии качества и их развитие одинаково значимы для современных мобильных операционных систем. На рис. 2 светлым тоном отмечены наиболее значимые категории развития качества, а тёмным — конкретные технические свойства и характеристики. Так, к наиболее значимым категориям качества относятся: развитие встроенных приложений, система хранения, систематизации и доступа к пользовательским файлам, своевременные обновления, упрощение систематизации пользовательских

Рис. 2. Структура системы менеджмента качества мобильных операционных систем и встроенных приложений

файлов, упрощение доступа к пользовательским файлам, многозадачность, разделение экрана, расширение сторонних возможностей использования, интеграция с устройствами сторонних производителей, развитие голосового помощника во внешних коммуникациях и адаптивность к сторонним инновациям. Очевидно, что светлые блоки встречаются во всех категориях технического качества, именно поэтому нельзя сосредоточиться только на нескольких. Однако глобальными блоками, требующими не только улучшения, но и развития, являются связанные со сторонним использованием мобильного телефона, а также с развитием встроенных приложений, в частности, в сфере хранения и систематизации данных. В будущем, с развитием мобильных операционных систем могут измениться как сами блоки, так и их приоритетность.

Заключение. В результате проведённого исследования и представленных данных становится очевидным, что менеджмент качества мобильных операционных систем является сложной системой, состоящей из концепции TQM, а также сложной структуры технического менеджмента качества. Технические параметры существенно зависят от актуального представления о качестве мобильной операционной системы, а также от динамики развития.

Основным ограничением проведённого исследования стал собранный массив данных, который для обеспечения сопоставимости и актуальности включал в себя только существующие на данный момент мобильные операционные системы.

Библиографические ссылки

1. **Total** quality management at Apple. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.coursebb.com/2017/02/16/total-quality-management-apple/ (дата обращения: 20.06.2018).

2. **Lee W.H.** et al. An analysis of trusted service manager development modes by mobile operating system designers in Taiwan // Electronic Commerce Research and Applications. 2015. Vol. 14. No. 6. P. 592—602.

3. **Lin F.X., Wang Z., Zhong L.** K2: a mobile operating system for heterogeneous coherence domains // ACM SIGARCH Computer Architecture News. 2014. Vol. 42. No. 1. P. 285—300.

4. **Charland A., Leroux B.** Mobile application development: web vs. native // Queue. 2011. Vol. 9. No. 4. P. 20.

5. **Canlar E.S.** et al. Windows mobile LiveSD forensics // Journal of Network and Computer Applications. 2013. Vol. 36. No. 2. P. 677—684.

Ссылка для цитирования

Назаренко М.А. Организация менеджмента качества мобильных операционных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 514—517.

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, д-р техн. наук., проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц., **А.А. Дюкин**
(МИРЭА — Российский технологический университет)
mikaeva@npo.lit.ru

БАКТЕРИЦИДНЫЙ РЕЦИРКУЛЯТОР

Описаны сборка и устройство медицинского бактерицидного передвижного рециркулятора, предназначенного для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в помещениях с повышенным риском распространения возбудителей инфекций. Потенциальный потребитель рециркулятора — младший сестринский персонал лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных, общественных и иных организаций. Рециркулятор укомплектован безозоновой амальгамной газоразрядной бактерицидной лампой низкого давления АНЦ 500/144-П2-2-28 FLOW.

Ключевые слова: установка; рециркулятор; устройство; сборка; воздух; обеззараживание; ультрафиолет; лампа; технические данные.

The assembly and device of a medical bactericidal mobile recirculator, assigned for air disinfection with ultraviolet radiation in rooms with an increased risk of the spread of pathogens, are described. A potential consumer of the recirculator is the nursing staff of medical, preventive, preschool, school, industrial, public and other organizations. The recirculator is equipped with an ozone-free amalgam gas-discharge bactericidal lamp with low pressure ANC 500/144-P2-2-28 FLOW.

Keywords: facility; recirculator; device; assembly; air; disinfection; ultraviolet; lamp; technical data.

Технология ультрафиолетового обеззараживания воды, воздуха и поверхностей основана на бактерицидном действии ультрафиолетового (УФ) излучения [1—5]. Ультрафиолетовое излучение — электромагнитное излучение, занимающее диапазон между рентгеновским и видимым излучением (длина волн от 100 до 400 нм) (рис. 1). Различают несколько участков спектра ультрафиолетового излучения, имеющих разное биологическое воздействие: УФ-А (315...400 нм), УФ-В (280...315 нм), УФ-С (200...280 нм), вакуумный УФ (100...200 нм). Электромагнитное излучение УФ-диапазона имеет длину волны 205...315 нм. Максимальная эффективность инактивации микроорганизмов наблюдается в диапазоне волн 250...270 нм (на этот участок спектра приходится длина волны, генерируемая УФ-лампами низкого давления — 254 нм). Бактерицидная эффективность — относительная эффективность инактивации для каждой длины волны спектра излучения. Эта величина условно зависит от поглощения нуклеиновыми кислотами каждой длины волны. УФ-доза — излучение, необходимое для достижения определённой степени обеззараживания. Данные о требуемых дозах для инактивации различных микроорганизмов получают в результате обобщения результатов экспериментов. УФ-доза — это мера бактерицидной энергии на единицу площади. Обычно она измеряется в мДж/см^2 или Дж/м^2 (1 мДж/см^2 = 10 Дж/м^2). В общем случае доза равна произведению УФ-интенсивности на время облучения. Применительно к УФ-оборудованию для обеззараживания, например, воды, доза рассчитывается исходя из мощности УФ-ламп, их количества, расстояния между лампами, срока наработки УФ-ламп, коэффициента УФ-пропускания, загрязнения кварцевых чехлов, расхода воды через УФ-реактор, геометрических размеров камеры обеззараживания и расчётного распределения воды в камере.

Из всего УФ-диапазона участок УФ-С часто называют бактерицидным из-за его высокой обеззараживающей эффективности по отношению к бактериям и вирусам. Максимум бактерицидной чувствительности микроорганизмов приходится на длину волны 265 нм.

УФ-излучение — это физический метод обеззараживания, основанный на фотохими-

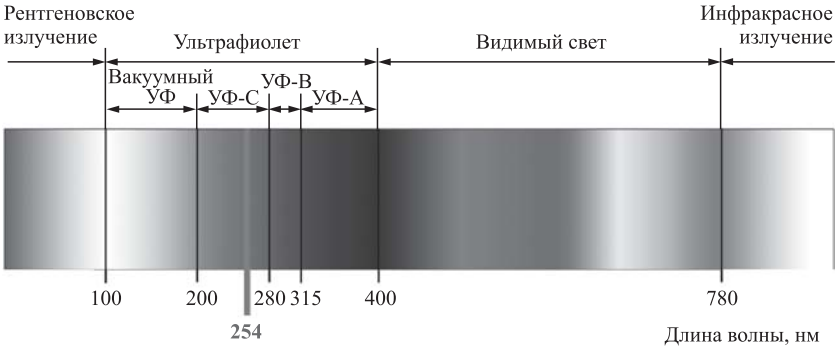

Рис. 1. Ультрафиолет в спектре электромагнитного излучения

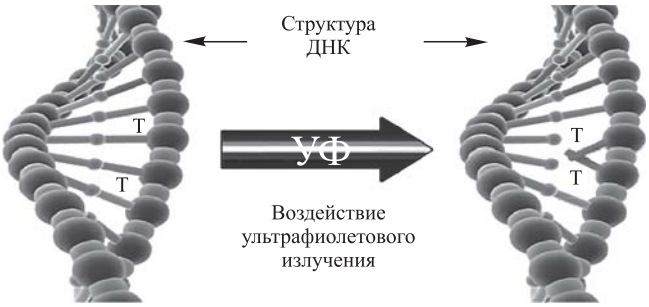

Рис. 2. Механизм УФ-обеззараживания

ческих реакциях, которые приводят к необратимым повреждениям дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и рибонуклеиновой кислоты (РНК) микроорганизмов. В результате микроорганизм теряет способность к размножению (инактивируется) (рис. 2).

Технология УФ-обеззараживания может применяться как в системах водоподготовки и водоотведения, так и при обеззараживании воздуха и поверхностей [6—9]. Основные преимущества УФ-технологии: высокая эффективность обеззараживания в отношении широкого спектра микроорганизмов, в том числе устойчивых к хлорированию микроорганизмов (таких, как вирусы и цисты простейших); отсутствие влияния на физико-химические и органолептические свойства воды и воздуха (не образуются побочные продукты, нет опасности передозировки); низкие капитальные затраты, энергопотребление и эксплуатационные расходы; УФ-установки компактны и просты в эксплуатации, не требуют специальных мер безопасности.

Основными промышленно применяемыми источниками УФ-излучения являются ртутные лампы высокого и низкого давления, в том числе их новое поколение — амальгамные лампы [10—12]. Лампы высокого давления обладают высокой единичной мощностью (несколько кВт), но более низким коэффициентом полезного действия (КПД) (9...12 %) и меньшим ресурсом, чем лампы низкого давления (КПД = 40 %), единичная мощность которых составляет десятки и сотни ватт. УФ-системы на амальгамных лампах чуть менее компактны, но гораздо более энергоэффективны, чем системы на лампах высокого давления. Поэтому требуемое количество УФ-оборудования, а также тип и количество используемых в нём УФ-ламп зависят не только от требуемой дозы УФ-облучения, расхода и физико-химических показателей качества обрабатываемой среды, но и от условий размещения и эксплуатации.

УФ-системы на основе амальгамных ламп обладают принципиально новым качеством и возможностями. Лаборатория импульсной техники (ЛИТ) разрабатывает и выпускает различные УФ-системы для обеззараживания воздуха и поверхностей на основе современных мощных амальгамных ламп различной конфигурации с КПД ~ 40 % и ресурсом до 16 тыс. ч (до двух лет непрерывной работы).

В УФ-лампах низкого давления вместо ртути используется амальгама. Такие лампы имеют бóльшую интенсивность, чем обычные ртутные лампы, при сохранении таких достоинств ламп низкого давления, как длительный срок службы и высокий КПД.

Применение мощных амальгамных ламп позволяет создавать принципиально более компактное и высокопроизводительное УФ-оборудование для обеззараживания воздуха и поверхностей в отличие от систем, использующих традиционные маломощные ртутные лампы низкого давления.

Отсутствие жидкой ртути в УФ-системах на основе амальгамных ламп делает их принципиально более экологичными и безопасными, в отличие от традиционных ртутных ламп. Всё оборудование ЛИТ изготавливается из устойчивых к УФ-излучению материалов: нержавеющая сталь, алюминий, тефлон, керамика, что отличает его от других УФ-систем, где применение пластиков и красок делает оборудование недолговечным и часто создаёт проблему запахов.

Разработанный рециркулятор предназначен для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в помещениях с повышенным риском распространения возбудителей инфекций в соответствии с требованиями руководства Минздрава России Р 3.5.1904—04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях» как в присутствии, так и при отсутствии людей.

Потенциальный потребитель рециркулятора — младший сестринский персонал лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных, общественных и иных организаций.

Рециркулятор укомплектован безозоновой амальгамной газоразрядной бактерицидной лампой низкого давления АНЦ 500/144-П2-2-28 FLOW. Ртуть внутри лампы находится в связанном состоянии, поэтому при бое лампы не требуется проводить меры по демеркуризации помещения [1—4].

Обеззараживание воздуха в рециркуляторе происходит за счёт воздействия на микроорганизмы бактерицидного УФ-излучения с длиной волны 254 нм. Инактивация микро-

организмов происходит за счёт сообщения им достаточной дозы УФ-облучения.

Рециркуляция воздуха осуществляется с помощью вентилятора. Воздух из помещения поступает внутрь рециркулятора снизу, проходит через жалюзи, поступает в ламповую зону, где происходит его обеззараживание, затем воздух проходит через жалюзи с вентилятором и поступает обратно в помещение. Климатическое исполнение рециркулятора — УХЛ, категория размещения 4 по ГОСТ 15150—69 при температуре окружающего воздуха в интервале от +1 до +35 °С и относительной влажности воздуха до 80 % при температуре +25 °С.

При воздействии УФ-излучения на живые микроорганизмы имеется оптимальный для их инактивации диапазон длин волн от 250 до 280 нм. Кривая указанного бактерицидного воздействия излучения на микроорганизмы приведена на рис. 3.

Доза облучения D, или количество энергии, сообщаемое микроорганизмам, которые содержатся в обрабатываемом воздухе, является главной характеристикой рециркулятора УФ-обеззараживания. Она равна произведению средней интенсивности УФ-облучения I на среднее время нахождения под облучением t:

$$D = \langle I \rangle \langle t \rangle,$$

где D — доза УФ-облучения; $\langle I \rangle$ — средняя интенсивность УФ-облучения; $\langle t \rangle$ — среднее время нахождения под облучением.

Экспериментально установленные значения летальных доз УФ-облучения для микроорганизмов различных видов приведены в руководстве Р 3.5.1904—04. Значения поверхностной D_s и объёмной D_v доз для некоторых микроорганизмов и двух уровней бактерицидной эффективности представлены в табл. 1.

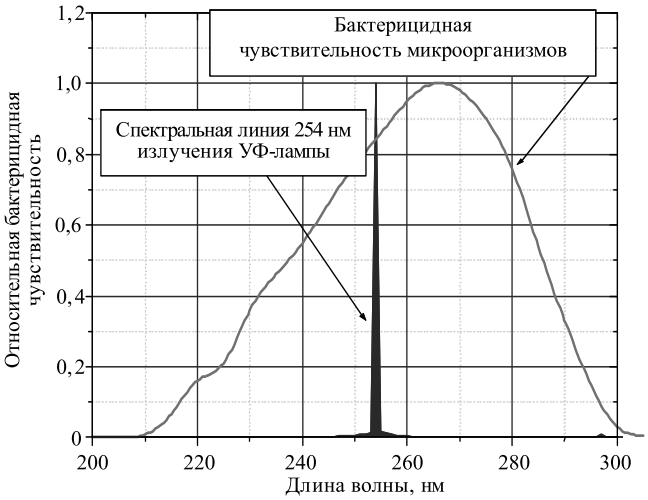

Рис. 3. Кривая бактерицидного действия ультрафиолетового излучения

Технические характеристики рециркулятора представлены в табл. 2, возможные режимы работы рециркулятора приведены в табл. 3, бактерицидная эффективность рециркулятора — в табл. 4.

Рециркулятор представляет собой корпус *1* с дверью (рис. 4), выполненный из окрашенной листовой стали и смонтированный на передвижной подставке с колёсиками *4*. Внутри корпуса расположены следующие компоненты: короб *8*, электронный пускорегулирующий аппарат *15* (далее — *ЭПРА*), автоматический

Таблица 1

Значение поверхностной и объёмной доз УФ-облучения для различных уровней бактерицидной эффективности

Вид микроорганизма	D_s, Дж/м^2 при $J_{бк}$		D_v, Дж/м^3 при $J_{бк}$	
	90 %	99,9 %	90 %	99,9 %
Bacillus Anthracis	45	87	118	507
Bacillus Subtilis	305	580	802	3380
Corynebacterium Dephtheriae	34	65	89	379
Escherichia Coli	30	66	79	385
Legionella pneumophila	20	38	53	221
Mycobacterium Tuberculosis	54	100	142	583
Pseudomonas Aeruginosa (environmental strain)	55	105	145	612
Pseudomonas Fluorescens	35	66	92	385
Salmonella Enteritidis	40	76	105	443
Salmonella paratyphoid (enteric fever)	23	61	60	356
Staphylococcus aureus	49	66	130	385
Influenza virus	36	66	95	385
Hepatitis virus	26	80	68	466
Poliovirus (Poliomyelitis)	110	210	289	1224
Rotavirus	130	240	342	1400
Aspergillus niger (black)	1800	3300	4734	19 240
Mucor ramosissimus (white gray)	194	352	510	2058
Penicillum digitatum (olive)	480	880	1262	5130
Paramecium	700	2000	1640	11 660
Baker's yeast	48	88	126	513
Brever's yeast	36	66	95	385
Common yeast cake	73	132	192	770
Saccaharomyces var. ellipsoides	73	132	192	770
Saccaharomyces sp.	97	176	255	1026

Таблица 2

Технические характеристики рециркулятора

Показатель	Значение
Рециркулятор закрытого типа	
Напряжение питания, В	220 ± 10 %
Частота питающего напряжения, Гц	50/60 ± 0,2
Тип электропитания	Однофазное
Количество ламп, шт.	1
Количество ЭПРА, шт.	1
Количество вентиляторов, шт.	1
Количество воздушных фильтров, шт.	1
Габариты: (высота × ширина × глубина), мм	1466×835×656
Масса, кг	Не более 100
Материал корпуса	Крашеная углеродистая сталь (08 кп, окраска RAL 7035)
Степень пыле- и влагозащищённости (ГОСТ 14254—96)	IP 20
Панель управления	ЖК-дисплей
Отключение по перегреву	Есть
Контроль времени наработки	Да
Сетевой кабель с вилкой	Да с УЗО
Длина сетевого кабеля, м	5
Время установления рабочего режима, мин	Не более 2
Продолжительность непрерывной работы, ч	Не менее 8
Основное электрооборудование	
Тип лампы	АНЦ 500/144-П2-2-28 FLOW
Срок службы лампы, ч	Не менее 12 000
Количество включений/выключений лампы	Не более 5000
Тип вентилятора	Центробежный D2E 146-HR93-03
Материал колбы лампы	Безозоновое кварцевое стекло
Тип ЭПРА	Электронный Л~220-1х600-2222-161
Потребляемая мощность, кВт	Не более 0,6
Класс оборудования по способу защиты от поражения электрическим током	I
Корректированный уровень звуковой мощности, дБА	Не более 50
Облучённость (интенсивность УФ-излучения) на расстоянии 1 м от источника излучения (при открытой крышке), Вт/м^2	Не менее 7,5
Воздушный фильтр	
Состав	Полотно фильтровальное, полотно из углеволокна
Класс очистки	G3
Возможность промывки	Да, но только для фильтровального полотна
Условия эксплуатации	
Расположение	В помещениях (indoor)
Тип помещений	Закрытые отапливаемые и вентилируемые
Относительная влажность при 25 °С, %	Не более 80
Температура окружающего воздуха, °С	+1...+35

выключатель *7*, концевой микропереключатель *14*, кабельный ввод *9*, дифманометр *6*, термостат, блок питания *10*, воздушный фильтр *11*. Короб с помощью жалюзи *13* и *17* разделён на две части. В нижней части короба располагается ламповая зона, где установлена бактерицидная УФ-лампа *16*, а в верхней части расположена венткамера, где установлен вентилятор *12*. На внешней стороне двери корпуса размещена панель управления *2*, с помощью которой осуществляются контроль, управление и настройка параметров рециркулятора. Подача питания на рециркулятор осуществляется главным выключателем *3*, расположенным на боковой панели корпуса. Для подключения рециркулятора к сети служит кабель, оснащённый устройством защитного отключения (УЗО).

Воздух из помещения засасывается через воздушный фильтр *11* снизу, проходит через жалюзи *17*, затем поступает в короб *8*, где происходит его обеззараживание. Далее воздух проходит через жалюзи *13* и вентилятор *12* и попадает обратно в помещение или в систему воздухораспределения (при наличии). Для предотвращения попадания внутрь рециркулятора через решётку вентилятора *5* различных предметов вентилятор снабжён сеткой. Верхние и нижние жалюзи сконструированы таким образом, чтобы исключить выход УФ-излучения наружу.

Для пуска и питания лампы используется ЭПРА. Прогрев УФ-лампы осуществляется в течение 2 мин, о чём на экране панели управления выводится соответствующее сообщение.

Для удобства контроля за работой рециркулятора пользователь может вывести общий сигнал «Авария» на удалённый диспетчерский пульт.

Рециркулятор может работать в двух режимах. Выбор режима осуществляется вручную на экране панели управления. Реализованы следующие функции с соответствующей индикацией на панели управления: контроль исправности УФ-лампы и ЭПРА; учёт времени нара-

Таблица 3

Режим работы

Режим	Производительность, м^3/ч	Уровень звуковой мощности, дБА	Количество включённых ламп	Бактерицидная доза D_s (254 нм) на конец службы лампы, Дж/м^2	Потребляемая мощность, кВт
1	250	Не более 40	1	Не менее 977	Не более 0,59
2	550	Не более 50	1	Не менее 444	Не более 0,6

Таблица 4

Бактерицидная эффективность ($J_{бк}$)

Микроорганизм	Режим работы	
	1	2
Плесневые грибы и дрожжи, %	99	90
Кишечная палочка, %	99,9	99,9
Золотистый стафилококк, %	99,9	99,9

ботки и числа включений УФ-лампы; контроль работы вентилятора; включение/выключение УФ-лампы и вентилятора; аварийное отключение рециркулятора; передача сигнала «Авария» (гальванически развязанные или «сухие» контакты) для последующего вывода данного сигнала на удалённый диспетчерский пульт. При работе рециркулятора на экране панели управления отображается информация о состоянии рециркулятора.

Эксплуатация рециркулятора закрытого типа должна осуществляться с соблюдением мер безопасности, а также с учётом требований руководства Минздрава России Р 3.5.1904—04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях».

К работе с рециркулятором допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности в соответствии с Правилами технической эксплуатации электроустановок и ознакомленные с устройством рециркулятора и правилами его эксплуатации.

На рециркулятор распространяются все требования по технике безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется от сети напряжением 220 В и частотой 50/60 Гц. В случае возникновения внештатной ситуации необходимо немедленно обесточить рециркулятор.

Рециркулятор должен быть размещён в помещении. Он подключается к однофазной сети напряжением 220 В переменного тока частотой 50/60 Гц с обязательным подключением заземляющего проводника.

По типу исполнения рециркулятор является передвижным. При окончательном размещении рециркулятора в помещении рекомендуется заблокировать передние колёсики с помощью тормозов.

При размещении рециркулятора следует учитывать необходимость свободного доступа к двери корпуса для проведения регламентных и ремонтных работ по замене лампы, обслуживанию фильтра, проверке состояния ЭПРА, контактов внутренней поверхности короба, где

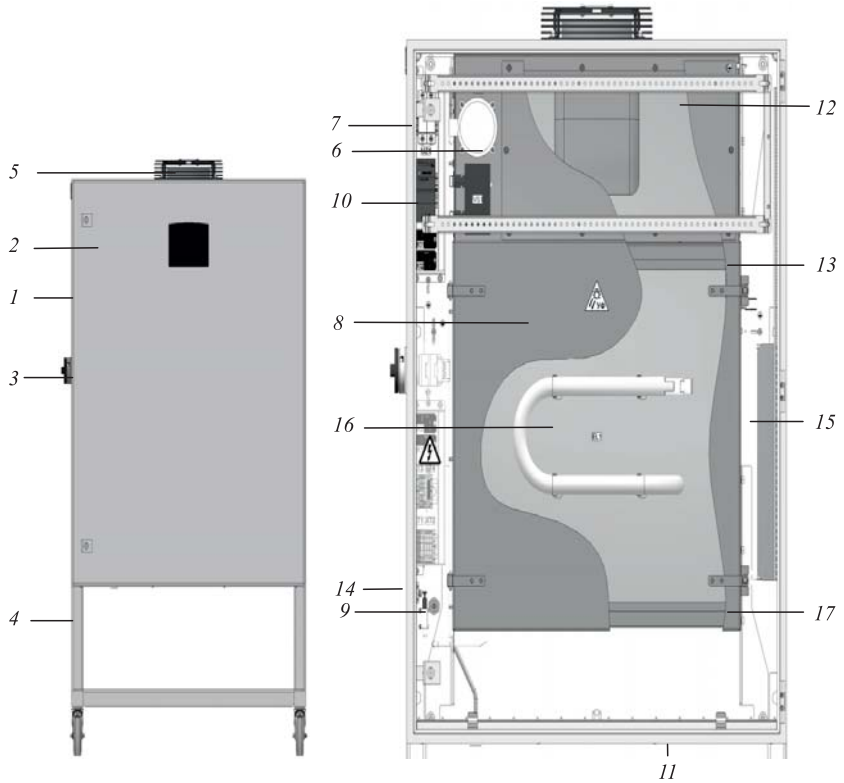

Рис. 4. Общий вид рециркулятора и основные составные элементы:
1 — корпус; *2* — панель управления; *3* — главный выключатель; *4* — подставка; *5* — решётка для вентилятора; *6* — дифманометр; *7* — автоматический выключатель; *8* — короб; *9* — кабельный ввод; *10* — блок питания; *11* — фильтр воздушный; *12* — вентилятор; *13* — жалюзи (верхние); *14* — концевой микропереключатель; *15* — ЭПРА; *16* — УФ-лампа; *17* — жалюзи (нижние)

расположена лампа, а также свободного доступа к главному выключателю, расположенному на боковой панели рециркулятора.

Рециркулятор должен размещаться в закрытом помещении по ходу основных потоков воздуха (например, вблизи отопительных приборов).

Не следует располагать рециркулятор вблизи решёток вытяжной вентиляции. В этом случае бóльшая часть очищенного рециркулятором воздуха может удаляться через вытяжное окно, не успевая распространяться в помещении. Также не следует размещать рециркулятор или устройства воздухораспределения так, чтобы выходящая воздушная струя создавала для людей дискомфортные условия.

В случае удалённого контроля сигнала «Авария» с «сухих контактов» необходимо завести кабель типа КСПВГ 2 × 0,35 (КСПВэГ 2 × 0,35) через кабельный ввод *9* (см. рис. 4), удалив установленную заглушку, и произвести подключение к клемме ХТ3 в соответствии с принципиальной электрической схемой, сняв предварительно защитный экран из оргстекла. По окончании электромонтажа защитный экран необходимо установить на место. Рециркулятор предназначен для непрерывной работы в помещении в течение рабочего времени.

Работа рециркулятора в присутствии людей обеспечивает снижение уровня микробной обсеменённости воздуха в помещениях объёмом до 500 м^3. Для обеспечения снижения уровня микробной обсеменённости воздуха в помещениях большего объёма число рециркуляторов следует увеличивать пропорционально увеличению объёма помещения.

Для обеспечения комфортных условий в помещениях, оборудованных рециркуляторами, следует соблюдать общепринятые правила воздухообмена, изложенные в СНиП 2.04.05—91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». Направление потока воздуха, создаваемого рециркулятором, по возможности должно совпадать с направлением основных конвективных потоков воздуха в помещении. При этом следует помнить, что в отопительный сезон радиаторы отопления создают над собой восходящие воздушные потоки, распространяющиеся затем вдоль потолка и опускающиеся у противоположной стены помещения.

При включении рециркулятора на ограниченный период минимальную продолжительность его работы ($T_{\min}$) рекомендуется определять так, чтобы обеспечивать как минимум однократное прохождение всего объёма воздуха помещения ($V_п$) через рециркулятор.

Режим работы рециркулятора выбирается в соответствии с данными, приведёнными в табл. 4.

Целесообразно совмещать включение рециркулятора с проведением ежедневных уборок перед началом функционирования помещения, так как в процессе уборки может происходить интенсивное микробиологическое загрязнение воздуха.

Рециркулятор может применяться в лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных и общественных организациях и других помещениях для снижения количества содержащихся в воздухе микроорганизмов и профилактики инфекционных заболеваний.

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат, 2004. 210 с.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.

3. **Микаева С.А.** Технология производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем. Ч. I. М.: МГУПИ, 2009. 210 с.

4. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем: дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московская государственная академия приборостроения и информатики, 2007.

5. **Микаева С.А., Петренко Ю.П.** Экспериментальные исследования генерации ультрафиолетового излучения // Учебный эксперимент в образовании. 2010. № 4. С. 82—88.

6. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302 — 307.

7. **Микаева С.А., Микаева А.С., Беленикина Е.С., Кулакова Л.Г.** Установки для обеззараживания воздуха и воды ультрафиолетовым излучением // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 1. С. 63—68.

8. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 11. С. 8—11.

9. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание ультрафиолетовым излучением // Учебный эксперимент в образовании. 2015. № 1 (73). С. 82—89.

10. **Mikaeva S.A., Mikaeva A.S.** Cermet solder for high-pressure sodium-vapor lamps // Glass and Ceramics. 2014. Vol. 71. No. 7—8. P. 292—293.

11. **Mikaeva S.A., Mikaeva A.S.** Reflective coatings // Glass and Ceramics. 2016. P. 1—2.

12. **Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E.** Increasing the quality of fluorescent lamps // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 72. No. 9—10. P. 387—389.

Ссылка для цитирования

Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Бактерицидный рециркулятор // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 518—523.

УДК 681.518

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрены алгоритмы оценивания, используемые в схемах коррекции инерциальных навигационных систем летательных аппаратов. Исследованы фильтр Калмана и его адаптивные модификации, способные функционировать в условиях отсутствия априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов. Оценка точности алгоритмов проведена с помощью математического моделирования и моделирования по данным полунатурного эксперимента с реальной инерциальной навигационной системой. Определение точности компенсации погрешностей проведено с помощью специальной методики.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; фильтр Калмана; адаптивный алгоритм оценивания; полунатурное моделирование.

The estimation algorithms used in the correction schemes of aircraft inertial navigation systems are considered. The Kalman filter and its adaptive modifications capable to function in the absence of a priori information about the statistical characteristics of the input and measuring noise are studied. Evaluation of the algorithms accuracy by using a mathematical modeling and modeling according to the data of a semi-natural experiment with a real inertial navigation system is carried out. The accuracy of error compensation was determined by using a special methodology.

Keywords: aircraft; inertial navigation system; Kalman filter; adaptive estimation algorithm; semi-natural modeling.

Введение. Для управления летательным аппаратом (ЛА) используется информация о его навигационных параметрах. Для определения навигационных параметров ЛА используют инерциальные навигационные системы (ИНС) [1]. Современные ИНС имеют погрешности, которые с течением времени функционирования накапливаются и снижают точность системы [1, 2]. Для повышения точности ИНС применяются различные схемы коррекции с использованием внешних измерительных систем и алгоритмов оценивания [3, 4].

В качестве алгоритма оценивания (АО) применяются различные модификации фильтра Калмана (ФК) [2, 5, 6], а также адаптивные модификации ФК, способные функционировать в условиях отсутствия априорной статистической информации о входных и измерительных шумах [7—10].

Для определения точности оценок использована специальная методика. При проведении математического моделирования сравнение оценок погрешностей ИНС осуществляется с априорной математической моделью исследуемого процесса, принятой за эталон.

В условиях построения оценок погрешностей ИНС по данным лабораторного эксперимента для непосредственно неизмеряемых компонент вектора состояния проводить сравнение не представляется возможным — эталон отсутствует. Поэтому для определения точности алгоритма оценивания по данным лабораторного эксперимента использована методика и данные лабораторного эксперимента с реальными ИНС И-21 и Ц060К.

Фильтр Калмана. Современные корректируемые ИНС в качестве основного внешнего измерителя используют спутниковую навигационную систему (СНС).

Коррекция ИНС в выходной информации системы обычно осуществляется посредством АО. Хорошо известный ФК теоретически позволяет получить оптимальную оценку вектора состояния системы [2].

Рассмотрим линейную систему, описывающую изменения погрешностей ИНС:

$$x_{k+1} = \Phi_{k+1} x_k + W_k, \quad (1)$$

где x_{k+1} — вектор состояния; Φ_{k+1} — матрица модели; W_k — вектор входного возмущения.

Входные возмущения предполагаются r-мерным дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей $\mathrm{M}[W_j W_k^T] = Q_k \delta_{j,k}$, где Q_k — неотрицательно определённая матрица; $\delta_{j,k}$ — символ Кронекера.

Часть вектора состояния измеряется как

$$z_{k+1} = H_{k+1} x_{k+1} + V_{k+1}, \quad (2)$$

где z_{k+1} — вектор измерений; V_{k+1} — m-вектор ошибок измерения; H_{k+1} — матрица измерений.

Ошибки измерений предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума, для которого $\mathrm{M}[V_{k+1}] = 0$; $\mathrm{M}[V_j V_{k+1}^T] = R_{k+1} \delta_{j,k+1}$, где R_{k+1} — неотрицательно определённая матрица.

Ошибки измерения и входные возмущения некоррелированны. Начальное значение вектора состояния полагаем гауссовым случайным вектором с нулевым математическим ожиданием, не зависящим от входных возмущений ошибок измерений: $\mathrm{M}[x_0 W_k^T] = 0$; $\mathrm{M}[x_0 V_{k+1}^T] = 0$ для любого k.

Оптимальная оценка вектора состояния определяется следующим образом:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k + K_{k+1} \upsilon_{k+1}, \quad (3)$$

где K_{k+1} — $(n \times m)$-матрица усиления фильтра; $\upsilon_{k+1} = z_{k+1} - H_{k+1,k} \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k$ — обновляемая последовательность; $\hat{x}_k$ — оценка вектора состояния.

На основе оценки вектора состояния и матрицы объекта делают прогноз для следующего шага вычисления оценки. Одновременно делают коррекцию этого прогноза путём использования обновляемой последовательности. Обновляемая последовательность представляет собой сумму ошибки прогноза и измерительного шума.

Матрица усиления ФК определяет вес, с которым обновляемая последовательность входит в оценку вектора состояния. В случае проведения идеальных измерений, т. е. когда измерительный шум отсутствует, матрица усиления выбирается максимальной. Чем больше измерительный шум, тем с меньшим весом учитывается обновляемая последовательность при формировании оценки вектора состояния.

ФК имеет вид

$$\begin{aligned} &\hat{x}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \hat{x}_k + K_{k+1} \upsilon_{k+1}; \\ &P_{k+1,k} = \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T + Q_k; \\ &K_{k+1} = P_{k+1,k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{k+1,k} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1}; \\ &P_{k+1} = (1 - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1,k}, \end{aligned} \quad (4)$$

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

С помощью ФК не только осуществляется восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влияние измерительного шума.

Начальными условиями на каждом новом цикле алгоритма служат оценка состояния системы и величина, характеризующая её погрешность.

Достаточно высокой точностью и в то же время простотой реализации в БЦВМ отличаются адаптивные АО, являющиеся прямыми модификациями ФК.

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

Адаптивный АО, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном шуме, отличается от ФК видом уравнения для определения априорной ковариационной матрицы ошибок оценивания, которое записывается в следующей форме [11]:

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + K_{k-1} \mathrm{M}[\upsilon_k \upsilon_k^T] K_{k-1}^T \quad (5)$$

или

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Delta P_{k,k-1}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{k,k-1} = [K_k H_k]^{-1} [K_k \mathrm{M}(\upsilon_k \upsilon_k^T) K_k^T - \\ - \Delta P_{k,k-1} H_k^T K_k^T] \{(K_k H_k)^{-1}\}^T. \end{aligned} \quad (7)$$

Адаптивный АО, способный функционировать при отсутствии априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов имеет следующий вид:

$$K_k = \begin{cases} P_{k,\,k-1} H_k^T [\mathrm{M}(\upsilon_k \upsilon_k^T)]^{-1}; \\ P_{k,\,k-1} H_k^T [H_k P_{k,\,k-1} H_k^T]^{-1} \end{cases} \quad \text{при} \begin{cases} \mathrm{diag}[\mathrm{M}(\upsilon_k \upsilon_k^T)] > \mathrm{diag}[H_k P_{k,\,k-1} H_k^T]; \\ \mathrm{diag}[\mathrm{M}(\upsilon_k \upsilon_k^T)] \leqslant \mathrm{diag}[H_k P_{k,\,k-1} H_k^T]. \end{cases} \tag{8}$$

Вычисление математического ожидания в адаптивном АО обычно осуществляется следующим образом:

$$\mathrm{M}(\upsilon_k \upsilon_k^T) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} (\upsilon_j \upsilon_j^T). \tag{9}$$

Моделирование погрешностей ИНС и алгоритмов оценивания. Для моделирования использована тестовая математическая модель погрешностей ИНС, а для проверки работоспособности алгоритмов — стационарная математическая модель погрешностей ИНС [11]:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + W_{k-1}, \tag{10}$$

где

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{\rho} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\beta T \end{bmatrix}; \quad W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix},$$

где δV_k — ошибки ИНС в определении скорости; φ_k — углы отклонения гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно сопровождающего трёхгранника; ε_k — скорость дрейфа ГСП; g — ускорение свободного падения; B — смещение нуля акселерометра, $B = 10^{-2}$; ρ — радиус Земли; T — период дискретизации; β — средняя частота случайного изменения дрейфа ГСП; ω_{k-1} — дискретный аналог белого гауссового шума.

Предполагается, что измеряется только первая компонента вектора состояния, т. е.

$$z_k = H x_k + V_k, \tag{11}$$

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.

ФК оценивает весь вектор состояния и подавляет измерительный шум. Оценка будет оптимальной, если правильно выбраны априорные значения матриц Q и R. При моделировании выбраны оптимальные значения ковариационных матриц входного и измерительного шумов $Q = 10^{-13}$, $R = 2500$ м/мин. Оптимальный выбор Q и R возможен только в случае, когда характеристики процессов W и V известны точно.

На практике такие случаи встречаются крайне редко. Поэтому исследовано качество оценивания ФК процессов с неизвестными характеристиками входного шума. Априорные статистические характеристики измерительного шума обладают большей достоверностью, поэтому полагаем R известной матрицей.

Оценки ошибок ИНС в определении скорости оптимального ФК составляют $\sigma_{\delta V} = 0{,}28$ м/с, а оценки углов отклонения ГСП — $\sigma_\Phi = 1{,}89 \cdot 10^{-5}$ рад.

При $R = 2500$, оптимальном значении $Q_1 = 10^{-16}$, заниженном значении $Q_2 = 10^{-18}$ и завышенном значении $Q_3 = 10^{-14}$ результаты математического моделирования показали, что в условиях отсутствия достоверных априорных данных о характеристиках шумов использовать ФК нецелесообразно, так как ошибки оценивания слишком велики и не позволяют повысить точность ИНС.

Оценки адаптивного АО ошибок ИНС в определении скорости с адаптивным АО $\sigma_{\delta V} = 0{,}31$ м/мин, а оценки углов отклонения ГСП — $\sigma_\Phi = 3{,}67 \cdot 10^{-5}$ рад.

Оценка точности алгоритмов коррекции погрешностей ИНС с использованием данных полунатурного эксперимента. Рассмотрим метод оценки точности АО по данным полунатурного эксперимента с реальной ИНС [12].

Функциональная схема ИНС с ФК представлена на рис. 1.

Точностные характеристики реальной ИНС определяются при её установке на неподвижном основании: выходная информа-

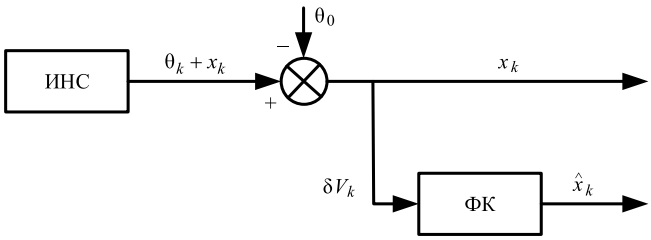

Рис. 1. Функциональная схема ИНС с ФК:
θ_k — истинная информация о навигационных параметрах; δV_k — ошибки ИНС в определении скорости; θ_0 — начальное значение информации о навигационных параметрах; x_k — вектор погрешностей ИНС; $\hat{x}_k$ — оценки погрешностей ИНС

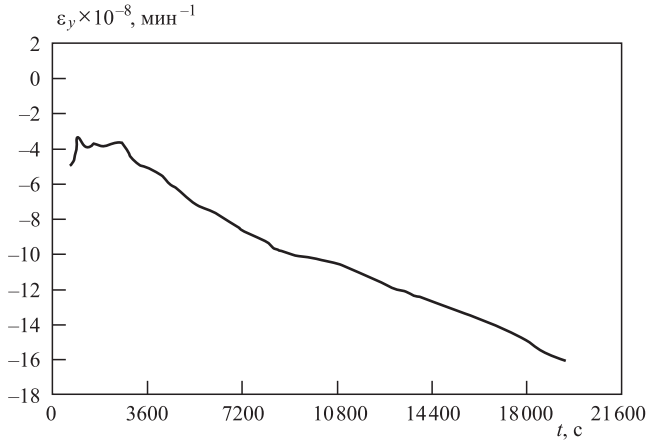

Рис. 2. Оценка горизонтального дрейфа ГСП Ц060К

ция о местоположении и скорости является погрешностью ИНС. На выходе АО получаем оценки погрешностей ИНС в определении скорости, углов отклонения ГСП от плоскости горизонта и горизонтальных дрейфов ГСП.

Оценка горизонтального дрейфа ГСП Ц060К представлена на рис. 2.

Погрешности ИНС в определении местоположения, полученные в ходе лабораторного эксперимента, необходимо сравнить с расчётными ошибками в определении широты и долготы, которые вычислены с помощью АО.

Погрешности реальной ИНС, установленной на неподвижном основании, обусловлены в основном дрейфами ГСП [12], поэтому рассчитаем погрешности системы, обусловленные горизонтальными дрейфами ГСП.

Для расчёта погрешностей ИНС в определении пройденного пути воспользуемся известной формулой [12]:

$$\delta x = -\varepsilon^* \rho \left(t - \frac{\sin \mu t}{\mu} \right), \qquad (12)$$

где δx — оценки северных составляющих погрешностей в определении ИНС; ε^* — постоянная составляющая дрейфа ГСП; $\mu^2 = g/\rho$.

Выражение (12) получено в предположении, что дрейф ГСП постоянен. Поэтому необходимо провести осреднение значений дрейфа ГСП, полученных АО на выбранных интервалах времени. Характер изменений с течением времени горизонтальных дрейфов ГСП, полученных по данным лабораторных экспериментов, позволяет провести осреднение на трёх интервалах: 0...100; 100...200; 200...325 мин.

Усреднённые оценки дрейфов ГСП подставляем в выражение (12), а полученные значения ошибки в определении пути используем для определения долготы по известной формуле [12]:

$$\lambda_k = \frac{\delta x}{\rho \cos \varphi}, \qquad (13)$$

где φ и λ — широта и долгота местоположения.

Расчётные значения погрешностей по широте и долготе сравним с погрешностями реальной ИНС в определении местоположения, которые получены при лабораторном эксперименте.

Моделирование по данным лабораторного эксперимента с реальной ИНС проводилось с использованием АО при разных значениях Q и адаптивного АО. Результаты моделирования различных ФК и адаптивного АО представлены на рис. 3.

Моделирование показало, что наилучшие результаты по оцениванию погрешностей реальной ИНС в определении долготы получены с помощью адаптивного АО. Точность определения долготы местности в среднем составила $5 \cdot 10^{-5}$ рад.

Результаты моделирования подтвердили адекватность оценок скорости дрейфа ГСП (см. рис. 2).

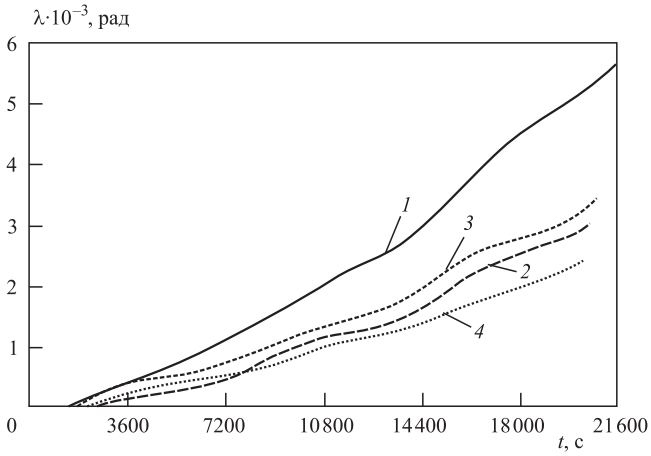

Рис. 3. Погрешности реальной инерциальной навигационной системы в определении долготы местности и их оценки:

1 — погрешности в определении долготы местности, полученные в процессе лабораторного эксперимента; *2* — оценки погрешностей реальной системы, полученные с помощью ФК с заниженным значением Q; *3* — оценки погрешностей реальной системы, полученные с помощью адаптивного АО; *4* — оценки погрешностей реальной системы, полученные с помощью ФК с завышенным значением Q

Результаты моделирования по данным лабораторного эксперимента продемонстрировали работоспособность и высокую точность адаптивного АО, а также его эффективность при использовании для коррекции ИНС.

Выводы. Рассмотрены АО, применяемые в схеме коррекции ИНС от СНС. Исследованы ФК с различными значениями ковариационной матрицы входного шума и АО, способные функционировать в условиях отсутствия достоверной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов. Результаты математического моделирования погрешностей ИНС показали преимущества адаптивных АО.

Оценка точности алгоритмов с использованием данных полунатурного эксперимента с ИНС Ц060К проведена с помощью известной методики и подтвердила эффективность АО.

Библиографические ссылки

1. **Бабиченко А.В., Никулин А.С., Радченко И.В.** Информационная интеграция инерциальной и спутниковой навигационных систем в модернизируемых бортовых комплексах высокоманевренных летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 11. С. 18—25.

2. **Балакришнан А.Б.** Теория фильтрации Калмана. М.: Мир, 1988. 166 с.

3. **Шэнь К., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

4. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С.** Инерциальная навигационная система с высокоточной алгоритмической коррекцией // Инженерная физика. 2018. № 5. С. 86—93.

5. **Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В.** Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 428—432.

6. **Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9—18.

7. **Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Reserch scalar filtering algorithm with selforganization method for modeling control system // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 80—82.

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

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

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

11. **Шэнь К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2016. № 2. С. 28—39.

12. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритмов построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 6. С. 40—43.

Ссылка для цитирования

Ху Ц., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Моделирование алгоритмов оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем по данным лабораторного эксперимента // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 524—528.

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 28.08.2019.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 22.10.2019.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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