Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71
1
2017

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
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»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (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)
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
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Мымрина И.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
ПИ № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Стариков А.В., Батурин К.В. Математическое обеспечение поддержки методики автоматизированного учёта заготовленной древесины . . . 3

Пищухин А.М., Пищухина Т.А. Автоматическое распределение разбуриваемых площадей при бурении разновращающимися коронками . . . 8

Кашаев Р.С., Козелков О.В., Хазиахметова Л.Р. Автоматическое энергоснабжение котельных топливными эмульсиями и система контроля их параметров релаксометром ЯМР . . . 10

Кармишин В.А., Неменко М.В. Выбор такта квантования, обеспечивающего устойчивость системы управления . . . 16

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Поклад М.Н., Ефанов Д.Е. Аналитический синтез законов управления продольным движением одновинтового вертолёта . . . 21

Медведев А.М., Мылов Г.В. Проектирование высокоплотных соединений в авионике . . . 27

Александров И.М., Евсевлеева Л.Г., Баденников А.В. Система управления процессом горения жидких топлив в промышленных печах на основе нечёткой нейронной сети . . . 32

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Гумаров С.Г., Золотов О.К., Волотов Е.М., Митрофанов И.В. Определение погрешности измерений, минимизирующей ошибки первого и второго рода . . . 37

Парфёнов Н.М., Чемоданов В.Б., Тимошенков А.С., Кузнецова Л.И. Исследование конструкторско-технологических особенностей формирования и разработки датчиков физических величин . . . 42

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Клочков Ю.С. Анализ эффективности разбиения на фиксированные группы при построении планов наблюдения методом "Центр оценки" . . . 45

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов . . . 48

CONTENTS

MODERN TECHNOLOGY

Starikov A.V., Baturin K.V. Support mathematical assurance of the methodology for harvested wood automatic accounting . . . 3

Pishchukhin A.M., Pishchukhina T.A. Automatic distribution of drilled areas at drilling with not identical rotating bits . . . 8

Kashaev R.S., Kozelkov O.V., Khaziakhmetova L.R. The boiler automatic power supply of the fuel emulsions and control system their parameters by using NMR-relaxometer . . . 10

Karmishin V.A., Nemenko M.V. Selection of the quantization clock, ensuring the stability of the control system . . . 16

INFORMATION TECHNOLOGY

Mikrin E.A., Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Poklad M.N., Efanov D.E. Analytical synthesis of longitudinal motion control laws for single-rotor helicopter . . . 21

Medvedev A.M., Mylov G.V. Designing of the high-density connections in avionics . . . 27

Aleksandrov I.M., Evsevleeva L.G., Badenikov A.V. Control system of the liquid fuels combustion process in industrial furnaces based on fuzzy neural network . . . 32

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Gumarov S.G., Zolotov O.K., Volotov E.M., Mitrofanov I.V. Determination of measurement error, minimizing errors of the first and second kind is considere . . . 37

Parfenov N.M., Chemodanov V.B., Timoshenkov A.S., Kuznetsova L.I. Study design and technological features of the formation and development of the physical quantities sensors . . . 42

ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Klochkov Yu.S. The effectiveness analysis of the partition on the fixed group at the observation plans construction method "Evaluation Center" . . . 45

SURVEY OF PERIODICALS

On the journals pages . . . 48

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) 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 27.10.2016.
Подписано в печать 21.12.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2017

УДК 630*526:681.3.06

А.В. Стариков, д-р техн. наук, доц., **К.В. Батурин**
(Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова)
Star123@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДДЕРЖКИ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЧЁТА ЗАГОТОВЛЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Рассмотрено математическое обеспечение, разработанное для поддержки методики автоматизированного учёта заготовленной древесины до её вывоза из леса, а также позволяющее реализовать автоматизированное измерение геометрических параметров круглых лесоматериалов и дальнейшее автоматическое определение их объёмов по индивидуальным (поштучным) и групповым методам учёта древесины.

Ключевые слова: математическое обеспечение; прикладное программное обеспечение; алгоритмы; автоматизированный учёт древесины; круглые лесоматериалы; объём древесины.

The mathematical assurance designed to support the methodology for harvested wood automatic accounting before its removal from the forest is considere. The mathematical assurance also allows to realize automatic measurement of the round timber geometric parameters and further automatic determination of their volumes from the wood individual (single-piece) and group accounting methods.

Keywords: mathematical assurance; applied software; algorithms; automated accounting of wood; round timber; the volume of wood.

Введение. В России ежегодный объём заготовки древесины составляет приблизительно 200 млн м^3. Одной из основных проблем организации устойчивого и эффективного лесного хозяйства является незаконная заготовка древесины. Так, в 2014 г. в Российской Федерации было выявлено более 18 тыс. случаев незаконной заготовки древесины с объёмом более 1,3 млн м^3. В сравнении с 2013 г. рост по объёму составил 21 % при снижении числа случаев на 2,6 %. На один случай рубки приходится в среднем 71 м^3 незаконно заготовленной древесины [1].

Требование учёта заготовленной древесины до вывоза её из леса обусловлено необходимостью снижения объёмов незаконной заготовки древесины. В соответствии с Федеральным законом № 415 "О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях" с 1 января 2015 г. вступили в силу следующие положения [2]:

1. Древесина, полученная при использовании лесов, а также при осуществлении мероприятий по их охране, защите, воспроизводству, подлежит учёту до её вывоза из леса.

2. Подача в электронном виде лесной декларации и отчёта об использовании лесов в единую государственную автоматизированную информационную систему учёта древесины и сделок с ней.

3. Транспортировка древесины любым видом транспорта осуществляется при наличии сопроводительного документа.

В настоящее время учёт заготовленной древесины в лесу включает большое количество ручных операций, связанных с измерением геометрических параметров круглых лесоматериалов и определением их объёмов. До сих пор определение размерных параметров и учёт объёмов древесины являются одним из наименее механизированных и автоматизированных процессов лесного комплекса. Из-за сложности формы и разнообразия нормируемых признаков древесины точность учёта объёмов лесоматериалов базируется на решениях, принимаемых учётчиками.

Определение объёма даже одного бревна требует большой внимательности, работа с объёмными таблицами и выполнение трудоёмких вычислений занимают достаточно длительное время, которое необходимо для учёта большого количества исходных данных о геометрических параметрах брёвен. Даже при высокой квалификации персонала учёт малых партий лесоматериалов может сопровождаться погрешностями, достигающими ±10...15 %.

Основная часть. *Постановка задачи.* С учётом изложенного выше одной из актуальных задач отечественного лесозаготовительного производства является разработка и совершенствование автоматизированных методов и программно-технических средств, повышающих точность измерения геометрических параметров круглых лесоматериалов и определение их объёма до вывоза из леса.

Для решения данной задачи требуются разработка математического обеспечения, предназначенного для поддержки методики автоматизированного измерения геометрических параметров лесоматериалов, и определение их объёма поштучными и групповыми методами учёта.

Методика автоматизированного учёта заготовленной древесины. В соответствии с [3] учёт заготовленной древесины — процедура, представленная совокупностью операций, включающих измерение объёма древесины, определение видового (породного) и сортиментного состава, а также оформление результатов учёта. Методы учёта объёма древесины и требования к средствам измерения диаметров и длин лесоматериалов приведены в ГОСТ 32594—2013 "Лесоматериалы круглые. Методы измерения" [4]. Автоматизированные средства и системы учёта лесоматериалов по погрешностям измерений показателей круглых лесоматериалов должны соответствовать требованиям настоящего стандарта, установленным для ручных измерений.

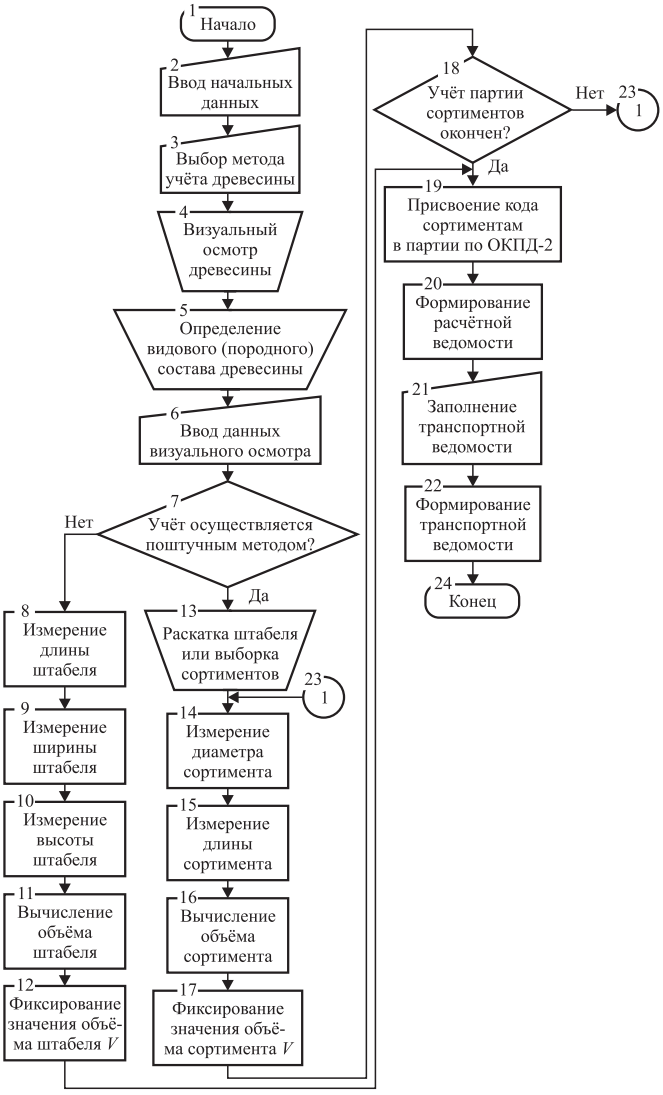


Рис. 1. Блок-схема процедуры автоматизированного учёта заготовленной древесины

Для решения поставленных задач разработана методика автоматизированного учёта заготовленной древесины, включающая автоматизированное измерение диаметров и длин брёвен и определение их объёма, и специализированные программно-технические средства её поддержки. Процедура автоматизированного учёта заготовленной древесины в соответствии с разработанной методикой представлена схемой, приведённой на рис. 1.

Методика определения видового (породного) состава древесины. Кратко суть процедуры автоматизированного учёта древесины заключается в следующем. Сначала учётчик вводит в программу, установленную на планшетном компьютере, ряд исходных данных (ФИО, дату учёта, название лесничества, номер лесного квартала и номер лесотаксационного выдела), необходимых для заполнения расчётной ведомости (блок 2). Затем в меню программы выбирается один из методов учёта древесины (блок 3), при этом для получения дополнительных исходных данных учётчику необходимо выполнить визуальный осмотр древесины. В ходе визуального осмотра (блок 4) он определяет признаки, характерные для определённого вида (породы) древесины (цвет и структура коры, цвет древесины на торцах, наличие ядра, ширина заболони и степень резкости перехода от ядра к заболони, степень видимости годичных слоёв и их очертания и др.).

Осуществляется также визуальный осмотр торцов и видимой части боковой поверхности древесины (блок 5) для выявления и оценки отличительных признаков определённого сортимента (разновидность кривизны древесины и её величина, диаметр сучков и высота их остатков, вид и размер гнили, цвет, форма и диаметр ядра, другие признаки, характеризующие особенности сортимента) [5]. Следует отметить, что результаты визуальной оценки

древесины в значительной степени зависят от опыта и профессиональной подготовки учётчика. Перечисленные данные осмотра заносятся учётчиком в программу (блок 6), поскольку они должны быть отображены в ведомости учёта.

В зависимости от выбранного метода учёта заготовленной древесины учётчик должен измерить соответствующие геометрические параметры сортиментов для вычисления их объёма. Если метод определения объёма древесины предусматривает проведение выборочных измерений, перед началом учёта необходимо провести выборку. При использовании поштучных методов учёта для доступа к каждому сортименту учётчик выполняет раскатку штабеля брёвен (блок 13).

Методика автоматизированного измерения геометрических параметров лесоматериалов. Для реализации процедуры автоматизированного учёта древесины разработана методика измерения геометрических параметров круглых лесоматериалов с использованием специализированного устройства на базе планшетного компьютера, оснащённого лазерными дальномерами и цифровой фотокамерой, с установленным специализированным прикладным программным обеспечением. Рисунок 2 иллюстрирует построения, необходимые для расчёта геометрических параметров круглых лесоматериалов.

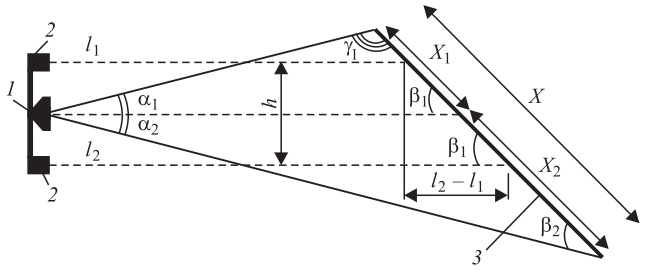


Рис. 2. Построения, необходимые для расчёта геометрических параметров круглых лесоматериалов:
1 — планшетный компьютер с цифровой фотокамерой; *2* — лазерные дальномерные модули; *3* — сортимент; l_1 и l_2 — длины, определяемые дальномерными модулями; X — искомая величина; h — конструктивно заданное расстоянием между лазерными дальномерными модулями; α_1, α_2 — углы, определяемые с помощью специальной шкалы, отображаемой на экране планшетного компьютера (шкала градуируется либо по эталонным углам, либо рассчитывается, исходя из фокусного расстояния и угла обзора объектива фотокамеры); β_1 — угол, определяемый из показаний двух лазерных дальномеров, жёстко закрепленных на линии, проходящей через оптический центр фотокамеры; γ_1 и β_2 — углы, определяемые в вычислениях

Измерение диаметра и длины заготовленных лесоматериалов осуществляется с помощью двух лазерных дальномерных модулей и цифровой фотокамеры, расположенных в корпусе устройства для автоматизированного учёта древесины. Принцип работы дальномерных модулей построен на основе импульсного лазера и детектора излучения. Выпущенные лучи отражаются от поверхности бревна и попадают в детектор излучения, что позволяет рассчитать расстояние до объекта на основании времени задержки выпущенного и отражённого лучей.

Для упрощения математических вычислений целесообразно разделить измерение искомой величины X на вычисление её двух частей X_1 и X_2, разделяемых осевой линией. Угол β_1 вычисляется как

$$\beta_1 = \operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h}.$$

В соответствии с теоремой синусов получаем выражение следующего вида:

$$\frac{X_1}{\sin\alpha_1} = \frac{\frac{l_1 + l_2}{2}}{\sin\gamma_1}, \qquad (1)$$

учитывая, что

$$\sin\gamma_1 = \sin\left(\alpha_1 + \operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h}\right),$$

получаем формулу вычисления

$$X_1 = \frac{\sin\alpha_1 (l_1 + l_2)}{2\sin\left(\alpha_1 + \operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h}\right)}. \qquad (2)$$

По аналогии с формулой (1) получаем соотношение для определения X_2:

$$\frac{X_2}{\sin\alpha_2} = \frac{\frac{l_1 + l_2}{2}}{\sin\beta_2},$$

получаем

$$X_2 = \frac{\sin\alpha_2 (l_1 + l_2)}{2\sin\left(\operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h} - \alpha_2\right)}. \qquad (3)$$

Для вычисления искомой величины X складываем правые части формул (2) и (3),

вынося за скобки общие множители, и получаем выражение вида:

$$X = \frac{l_1 + l_2}{2}\left(\frac{\sin\alpha_1}{\sin\left(\alpha_1 + \operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h}\right)} + \frac{\sin\alpha_2}{\sin\left(\operatorname{arcctg}\frac{l_2 - l_1}{h} - \alpha_2\right)}\right).$$

Длину сортиментов измеряют как наименьшее расстояние между двумя параллельными плоскостями, пересекающими бревно у каждого торца, перпендикулярно к его продольной оси (блок 15). Полученное значение длины деловых сортиментов уменьшают на величину припуска и допускаемого отклонения, установленных в государственных стандартах. Длину бревна необходимо фиксировать в метрах с округлением результата до второго знака после запятой.

Диаметр сортиментов измеряют в долях сортимента по длине перпендикуляра между двумя параллельными прямыми, касающимися окружности поперечного сечения бревна с противоположных сторон (блок 14). Для сортиментов, которые при визуальной оценке признают круглыми, допускается проводить одно измерение диаметра, для овальных брёвен необходимы два измерения, одно перпендикулярно другому, результатом является среднее арифметическое двух полученных значений. Диаметр сортиментов фиксируют, округляя до миллиметра.

Измерение геометрических параметров штабеля (блоки 8—10). У штабелей брёвен, сформированных на земле, размер, зависящий от длины сортиментов, обычно является меньшим, поэтому его называют шириной штабеля, а протяжённость стороны штабеля, образованной торцами брёвен — длиной штабеля. Для более точного измерения высоты таких штабелей их с обеих сторон разделяют вертикальными линиями на секции равной длины. Длина секций — не более 3 м. Высотой штабеля считают среднее значение высот всех секций штабеля.

Используемые методы учёта объёма круглых лесоматериалов. Объём заготовленных круглых лесоматериалов определяют по методам учёта древесины, установленным в [3]. Правила включают следующие методы: поштучный секционный, концевых сечений, учёта по верхнему диаметру, штабельный метод учёта и метод учёта по числу брёвен в партии.

Метод концевых сечений. Данный метод используют при необходимости проведения учёта партии древесины с высокой точностью. Метод применим для всех видов древесины без предварительного выборочного измерения показателей, необходимых для использования в других методах учёта объёма круглых лесоматериалов (блок 16).

У каждого сортимента измеряются верхний и нижний диаметры и длина. Объём брёвен вычисляется по формуле [4]:

$$V = \frac{3{,}1416L\left(d^2 + D^2\right)}{80\,000},$$

где V — объём сортимента, м^3; d — верхний диаметр сортимента, см; D — нижний диаметр сортимента, см; L — номинальная или учётная длина сортимента, м.

Метод учёта по верхнему диаметру. Метод предназначен для ручного учёта партий ценных сортиментов, учёта партий сортиментов, для которых невозможно или неоправдано применение групповых методов учёта. Метод предусматривает выборочное измерение поправочного коэффициента на сбег брёвен для каждого сортимента и породы, которое должно проводиться не реже одного раза в три года. Объём выборки не менее 400 брёвен.

У каждого бревна выборки должны быть измерены верхний и нижний диаметры и длина бревна. Регистрация результатов измерения диаметров проводится с округлением до 1 мм.

Для выборки необходимо вычислить объём сортиментов по методу концевых сечений (формула 13) [4] и объём сортиментов по методу верхнего диаметра и нормального сбега, определяемый по формуле [4]:

$$V_{\text{Н.С}} = \frac{3{,}1416L}{8\,000\,000}\left(d^2 + \left(d + SL\right)^2\right),$$

где $V_{\text{Н.С}}$ — объём сортимента по методу верхнего диаметра и нормального сбега, м^3; d — верхний диаметр сортимента, мм; L — номинальная или учётная длина сортимента, м; S — нормальный сбег брёвен; S = 10 мм/м.

Поправочный коэффициент на сбег определяют по формуле [4]:

$$K_{\text{С.С}} = \frac{V_{\text{К.С}}}{V_{\text{Н.С}}},$$

где $K_{\text{С.С}}$ — поправочный коэффициент на сбег брёвен для сортимента; $V_{\text{К.С}}$ — общий объём сортиментов в выборке, измеренный по методу кон-

цевых сечений, м^3; $V_{Н.С}$ — общий объём сортиментов в выборке, измеренный по методу верхнего диаметра и нормального сбега, м^3.

Для определения объёма партии (блок 16) по методу верхнего диаметра необходимо у всех сортиментов измерить верхний диаметр и длину, значение объёма вычисляется по формуле [4]:

$$V = \frac{3{,}1416L}{80\,000}\left(d^2 + \left(d + SL\right)^2\right)K_{С.С}.$$

Штабельный метод учёта. Штабельный метод используют для учёта всех видов древесины, уложенной в штабель. Метод предусматривает измерение геометрических параметров и складочного объёма каждого штабеля партии, а также выборочное измерение коэффициента полнодревесности, используемого для вычисления объёма сортиментов в штабеле по складочному объёму, или визуальная оценка коэффициента полнодревесности для штабеля (блок 11).

Визуальная оценка коэффициента полнодревесности выполняется для каждого учитываемого штабеля (или секции штабеля) по результатам осмотра штабеля с выборочным контрольным учётом для оценки и корректировки погрешностей визуальных оценок коэффициентов полнодревесности. Визуальная оценка осуществляется учётчиком древесины, имеющим опыт квалифицированного проведения учёта партий древесины штабельным методом с визуальными оценками коэффициента полнодревесности, подтверждённого соблюдением допускаемых погрешностей учёта.

Складочный объём штабеля сортиментов вычисляют по формуле [4]:

$$V_с = BHL,$$

где $V_с$ — складочный объём штабеля, м^3; L — длина штабеля, м; B — ширина штабеля, м; H — высота штабеля, м.

Коэффициент полнодревесности штабеля сортиментов вычисляют по формуле [4]:

$$K_{П.С} = \frac{V_{К.С}}{V_с},$$

где $K_{П.С}$ — коэффициент полнодревесности; $V_{К.С}$ — общий объём сортиментов в штабелях выборки по результатам контрольного поштучного учёта методом концевых сечений, м^3; $V_с$ — общий складочный объём штабелей выборки, м^3.

Объём сортиментов в штабеле определяют по формуле [4]:

$$V = V_с K_{П.С},$$

где V — объём партии сортиментов в штабеле, м^3.

Полученное значение объёма сортиментов или штабеля фиксируется в программе (блоки 12, 17), а сортиментам присваивается код в соответствии с общероссийским классификатором продукции по видам экономической деятельности (блок 19). По окончании учётных работ программа автоматически формирует расчётную ведомость (блок 20). Также в соответствии с [2] для транспортировки древесины необходимо наличие специального сопроводительного документа. Для формирования транспортной ведомости в программе (блок 22) учётчик вводит сведения о собственнике, грузоотправителе, грузополучателе, номер декларации о сделках с древесиной и номер государственного регистрационного знака транспортного средства (блок 21).

Заключение. Рассмотренная методика позволяет повысить эффективность организации учёта заготовленной древесины до её вывоза из леса. Применение современных средств автоматизированного измерения геометрических параметров круглых лесоматериалов обеспечивает снижение трудоёмкости и длительности технологических операций, выполняемых учётчиками. Использование прикладного программного обеспечения для определения объёма заготовленной древесины позволяет повысить точность учёта, а также исключает возможность возникновения ошибок в декларировании отчётной документации.

Библиографические ссылки

1. **О незаконных** рубках. URL: http://www.ecogazeta.ru/archives/9147 (дата обращения: 05.02.2016).

2. **Федеральный** закон Российской Федерации № 415-ФЗ "О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях". М.: 2013. 25 с.

3. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30.03.2015 № 154 "Об утверждении порядка определения видового (породного) и сортиментного состава древесины". М.: 2015. 2 с.

4. **ГОСТ 32594—2013** Лесоматериалы круглые. Методы измерений. Введ. 2015-01-01. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2013. 36 с.

5. **Постановление** Правительства Российской Федерации № 1525 "Об утверждении Правил учёта древесины". М.: 2014. 18 с.

УДК 622.24.051.53/54

А.М. Пищухин, д-р техн. наук, проф., **Т.А. Пищухина,** канд. техн. наук, доц.
(Оренбургский государственный университет)

Pishchukhin55@mail.ru

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗБУРИВАЕМЫХ ПЛОЩАДЕЙ ПРИ БУРЕНИИ РАЗНОВРАЩАЮЩИМИСЯ КОРОНКАМИ

Рассмотрены вопросы автоматического распределения площадей, разбуриваемых кольцевой и круговой коронками бурового инструмента с уравниваниванием реактивных моментов от бурения скважины. Все функции автоматической системы управления реализуются механическими средствами. Обсуждены факторы, влияющие на классические показатели качества системы управления: точность, быстродействие и запас устойчивости.

Ключевые слова: бурение разновращающимися коронками; функциональная схема системы управления; точность; быстродействие; запас устойчивости.

The questions of the drilled areas automatic distribution drilled with annular and circular bits of the drilling tool with equalization of the reactive torque from the well drilling are considered. All automatic control system functions are implemented by mechanical means. The factors influensing on the quality classical indices of the management system: accuracy, operating speed and stability reserve are discussed.

Keywords: drilling with not identical rotating bits; functional diagram of the control system; accuracy; operating speed; stability reserve.

При бурении скважин большой объём работ связан с проведением спускоподъёмных операций. Несмотря на имеющиеся успехи в автоматизации этого процесса, он остаётся энергоёмким и затратным. Вместе с тем есть способ максимально упростить этот процесс, используя шланго-кабельное бурение. При этом существует проблема снятия реактивного момента, возникающего при бурении, со шланга.

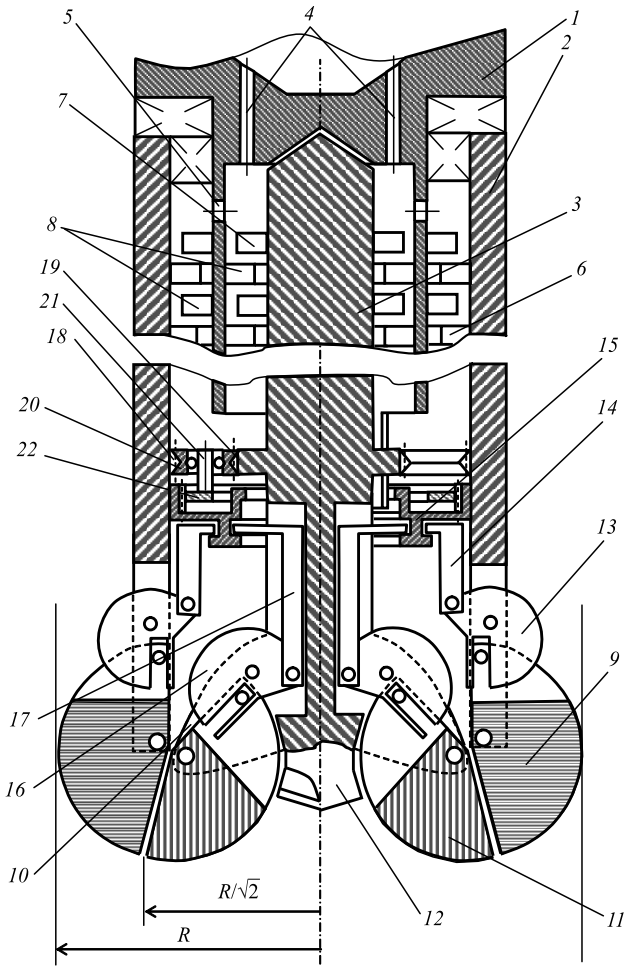
В работе [1] предложено снимать крутящий момент со шланга, разделив площади разбуривания на две части: круговую и кольцевую и разбуривать их в противоположных направлениях. Эти площади должны быть поделены в пропорции, уравнивающей реактивные моменты, возникающие при бурении в стационарном режиме. При возрастании момента, например, на круговой площади разбуривания, необходимо её уменьшать, сокращая радиус и увеличивая тем самым кольцевую площадь разбуривания и наоборот.

Вследствие невозможности вмешательства человека в процесс уравнивания моментов предложено полностью его автоматизировать. Этап технологизации [2] при этом сводится к определению функциональной схемы. Особенность проводимой автоматизации — реализация всех функций механическими средствами.

Объектом управления в технологическом процессе уравнивания реактивных моментов являются буровые коронки, а управляемой величиной — угол поворота их режущих кромок в осевой плоскости скважины. Функцию датчика равенства моментов и одновременно сравнивающего устройства может выполнять дифференциальный механизм, одно солнечное колесо которого связано с кольцевой, а второе — с круговой буровыми коронками. Результат сравнения влияет на поведение оси сателлита или связанного с ним водила. Исполнительным устройством является водило с совокупностью поводков, превращающих движение оси сателлитов в угол поворота режущих кромок буровых коронок.

Технически описанный процесс можно осуществить с помощью устройства, показанного на рисунке [3]. Промывочная жидкость поступает из буровой колонны (бурового шланга) через окна *4* к лопаточным венцам *7* внутреннего ротора турбобура *3* и через окна *5* — к лопаточным венцам *6* наружного ротора турбобура *2* под давлением и вращает наружный и внутренний роторы турбобура в противоположных направлениях. Лопаточные венцы *8* статора турбобура *1* при этом неподвижны и разворачивают поток промывочной жидкости. При равенстве крутящих моментов на наружном и внутреннем роторах турбобура их вращение осуществляется с равными угловыми скоростями. При этом оси *21* сателлитов *20*, находящиеся в зацеплении с зубчатыми венцами *18* и *19*, стационарны и не двигаются относительно статора турбобура.

При возрастании реактивного момента, например, на наружном роторе турбобура из-за



Устройство для бурения с изменением разбуриваемых площадей

более твёрдой породы угловая скорость его вращения падает. Оси сателлитов приходят в движение и благодаря винтовому соединению между водилом *22* и тарелкой *15* тянут тарелку вверх. Это движение увлекает за собой наружные поводки *14*, которые вращают наружные поворотные шайбы *13*, последние, в свою очередь, поворачивают буровые коронки *9* и уменьшают кольцевую площадь разбуривания. Одновременно через внутренние поводки *17* и внутренние поворотные шайбы *16* поворачиваются внутренние буровые коронки *11*, увеличивая круговую площадь разбуривания до тех пор, пока моменты резания на буровых коронках не уравняются. Аналогично происходит изменение площадей в случае возрастания момента резания на внутреннем роторе турбобура, при этом движение осей сателлитов вместе с водилом, тарелки, поводков, поворотных шайб и буровых коронок меняет направление на противоположное. Для исключения соприкосновения внутренних буровых коронок бурение на оси устройства осуществляется пером *12*.

Функцию задатчика уставки в системе автоматического управления выполняет тарелка, которая соединена с неподвижным статором шлицами для предотвращения её вращения и одновременно обеспечения возможности вертикального перемещения. Уставка задаётся при сборке устройства так, чтобы оси сателлитов при равенстве моментов находились строго в середине между лапками статора, на которых нарезано шлицевое соединение с тарелкой.

От данной системы управления требуются высокие значения классических показателей качества: точность, быстродействие и запас устойчивости.

На точность уравнивания моментов влияют силы трения и зазоры в соединяющихся частях устройства и трения буровых коронок о разбуриваемую породу при изменении угла поворота их режущих кромок в статике, а также инерционность этих частей в динамике.

На быстродействие системы управления влияет инерционность всех частей исполнительного устройства: сателлитов, тарелки, поводков, поворотных шайб, а также самих буровых коронок.

Устойчивость системы может быть нарушена возникновением незатухающих колебаний, для анализа которых необходимо выполнить кинематический расчёт, или явлением перегрузки буровых коронок кольцевой или круговой части забоя при локальном возрастании твёрдости разбуриваемой породы. В последнем случае ось сателлита будет двигаться до столкновения с лапками статора и потери выравнивающей способности. Дифференциальный механизм заблокируется и турбобуры будут вращаться с одинаковыми угловыми скоростями, пока этот локальный участок не будет пройден. Если же момент на одном из турбобуров возрастёт настолько, что не хватит мощности привода, то из этого неустойчивого состояния устройство может вывести только вмешательство человека путём поднятия устройства над забоем и дальнейшего его плавного опускания.

Библиографические ссылки

1. **Пищухин А.М., Пищухина Т.А.** Совершенствование технологии шланго-кабельного бурения // Бурение и нефть. 2015. № 11. С. 46—47.

2. **Пищухин А.М., Ахмедьянова Г.Ф.** Автоматизация и технологизация — два аспекта технического оснащения производства // Вестник ОГУ. 2015. № 9 (184). С. 33—36.

3. **Пищухин А.М., Провоторов С.И., Ахмедьянова Г.Ф.** Способ бурения и устройство для его осуществления / А.М. Пищухин, С.И. Провоторов, Г.Ф. Ахмедьянова. Заявка № 2013139725/03, опубл. 10.03.2015.

УДК 621.10 + 536.5

Р.С. Кашаев, д-р техн. наук, проф., **О.В. Козелков,** канд. техн. наук, доц.,
Л.Р. Хазиахметова, канд. техн. наук
(Казанский государственный энергетический университет)

kashaev2007@yandex.ru

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ КОТЕЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫМИ ЭМУЛЬСИЯМИ И СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛАКСОМЕТРОМ ЯМР

Описана структура автоматического энергоснабжения котельных топливной водомазутной эмульсией. Предложены система поддержания концентрации воды в эмульсии, управляемая от проточного релаксометра ЯМР, и контроль расхода, концентрации воды и дисперсности по данным ЯМР-релаксации.

Ключевые слова: энергоснабжение котельных; топливная эмульсия, автоматическая система; концентрация воды; ЯМР; релаксация.

The structure of the boilers automatic fuel supply with water-oil emulsions is described. A system for maintaining the water concentration in the emulsion, controlled from running NMR-relaxometer, and flow control, water concentration and dispersion according to data NMR-relaxation are proposed.

Keywords: boilers power supply; fuel emulsion; automatic system; the concentration of water; NMR; relaxation.

Введение. Мировая энергетика делает ставку на топливные эмульсии как альтернативу тяжелым нефтяным остаткам — мазуту (М), котельному топливу (КТ), а также дизельному топливу (ДТ) в качестве топлива для тепловых электростанций (ТЭС), котельных и дизель-генераторов. Использование, например, водомазутных эмульсий (ВМЭ) и эмульсий из котельного топлива даёт преимущества, связанные с диспергированием М, за счёт взрыва капель в пламени факела: быстрое сгорание и практически полная конверсия углерода; возможность сжигания при малых концентрациях кислорода; низкая температура сжигания, что снижает на порядок выбросы в атмосферу полиароматических канцерогенных соединений и на 65...80 % — выбросы окислов азота NO_x; возможность использования золы в качестве руды таких стратегически важных металлов, как ванадий и никель, концентрация которых достигает 260 и 55 мг/кг. Использование ВМЭ на ТЭС и котельных позволяет экономить углеводороды (УВ), при этом оборудование котлов ТЭС и котельных требует минимальной адаптации, затраты на которое окупаются в течение года.

Применение обводнённых нефтяных остатков (М, КТ и ПБ) и ДТ в виде эмульсий экономически целесообразно. Появляется возможность использовать большое количество бросовых, сильно обводнённых нефтяных остатков, слив и хранение которых в открытых ямах связано с загрязнением водоёмов и опасностью возникновения пожаров. Переработка отходов в топливные эмульсии обеззараживает промышленные водные стоки, содержащие нефтяные остатки и другие органические примеси [1]. В мировой энергетике на использование топливных эмульсий в энергоснабжении котельных было обращено внимание в работе [2]. В более поздней работе [3] исследовалась эффективность 5-, 10-, 15- и 20%-ной водно-дизельных эмульсий при оборотах дизельной машины 1200 и 3300 мин$^{-1}$. Был отмечен рост мощности дизеля с ростом концентрации воды в топливе. В работе [4] продемонстрировано, что использование водно-дизельной (10 % воды) эмульсии с размерами капель воды 20...30 мкм снижает выбросы SO_2 на 10 ppm и сокращает потребление топлива с 3,4 до 2,9 л/ч.

Система поддержания концентрации воды в ВМЭ. Предложена автоматическая система топливоснабжения и поддержания параметров эмульсии в нормативных пределах с управлением от анализатора (релаксометра) ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Для использования ВМЭ необходима система поддержания концентрации воды при значении 20 ± 2 %.

Рассмотрим реализацию такой системы топливоснабжения и поддержания постоянства технологического параметра на примере котельной ДКВР-10-13 паропроизводительностью 45 т/ч закрытого типа, предназначенной для централизованного теплоснабжения систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, а также технологических потребителей. Область применения — районы с расчётной температурой наружного воздуха минус 20; 30 и 40 °С. В качестве вида топлива использован мазут М-100 плотностью ρ_{20} = 957 кг/м^3, вязкостью η = 10,8 мПа·с при 80 °С, теплотворной способностью Q_n^P = = 9170 ккал·кг$^{-1}$. Теплоносители: перегретая вода с температурой 150÷70 °С (60 %) для системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения и насыщенный пар давлением 7 атм (40 %) для технологических потребителей. Вода подготавливается в водоподогревательной установке теплопроизводительностью 14,1 Гкал/ч. Мазут подогревался до температуры 60 °С. Система топливоснабжения и поддержания концентрации воды в ВМЭ, реализуемая на котельной ДКВР-10-13, показана на рис. 1.

В системе (см. рис. 1) необходимо регулировать процентное соотношение воды в смеси, поступающей в котёл, и поддерживать диаметр капель воды 10...30 мкм, отслеживая количество воды и дисперсности в смеси методом ЯМР-релаксометрии. Поддержание параметра осуществляется с помощью датчика технологического параметра (ДТП) на основе проточного экспресс-анализатора ЯМР [5] для определения расхода, концентрации воды, дисперсного распределения капель, вязкости и газа, разработанного для контроля параметров скважинной жидкости.

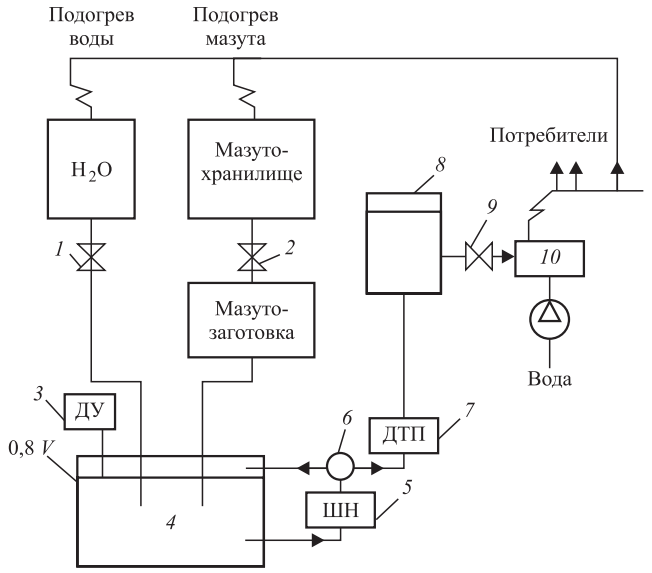


Рис. 1. Принципиальная схема системы топливоснабжения и поддержания концентрации воды в ВМЭ:
1, *2* и *9* — вентили; *3* — ДУ — термодифференциальный сигнализатор уровня, СУПТ 201 Ex; *4* — ёмкость; *5* — ШН — шестерённый насос марки Ш5-25; *6* — клапан; *7* — ДТП — датчик технологического параметра (ЯМР-анализатор); *8* — промежуточная ёмкость; *10* — котёл для сжигания ВМЭ

Система поддержания параметров ВМЭ (см. рис. 1) обеспечивает равномерную подачу смеси в паровой котёл и поддерживает её в необходимой консистенции. Смесь образуется смешиванием мазута и воды в ёмкости *4*. Мазут и вода начинают поступать при последовательном открывании вентилей *1* и *2*. Эти жидкости заполняют ёмкость до объёма 0,8*V* (*V* — объём ёмкости *4*), контролируемого датчиком уровня. При заполнении 0,8*V* срабатывает датчик уровня, вентили *1* и *2* закрываются и переходят в режим ожидания. При понижении уровня в ёмкости до 0,5*V* датчик уровня работает на открывание вентилей *1* и *2*. После заполнения ёмкости включается шестерённый насос. Он перемешивает топливо и воду в течение заданного времени $t_{зад}$, необходимого для достижения заданного диаметра капель. По истечении этого времени открывается клапан, смесь начинает поступать в промежуточную ёмкость. В это время смесь анализируется датчиком технологического параметра — проточным анализатором ЯМР на концентрацию воды и дисперсность, контролируется расход смеси.

В зависимости от процентного соотношения воды в ВМЭ открывается либо вентиль *1*, либо *2*. Время открытого состояния вентилей зависит от количества воды. Если ВМЭ отвечает заданным параметрам, открывается вентиль *9* и смесь подаётся в котёл. Предусмотрен также вариант впрыска воды непосредственно в факельной форсунке.

Алгоритм функционирования системы. Запишем логические операторы (рис. 2) функционирования системы, показанной на рис. 1:

A_0 — начало алгоритма; A_1 — сигнал на открытие вентиля *1* для заполнения ёмкости *4*; A_2 — сигнал на открытие вентиля *2* для заполнения ёмкости *4*; A_3 — контроль уровня смеси до заполнения ёмкости *4*; A_4 — закрытие вентилей *1* и *2* (срабатывание ДУ *3*); A_5 — включение ШН *5*; A_6 — перемешивание смеси; A_7 — открытие клапана *6* на подачу смеси в ёмкость *8*;

A_8 — анализ смеси ДТП *7*; A_9 — открытие вентиля *9*, подача ВМЭ в котёл *10*; A_{10} — фиксирование открытого состояния вентиля *2*; A_{11} — фиксирование открытого состояния вентиля *1*; $A_{1.1}$ — сигнал открытия вентиля *2* для коррекции состояния ВМЭ; $A_{2.1}$ — сигнал открытия вентиля *1* для коррекции смеси ВМЭ.

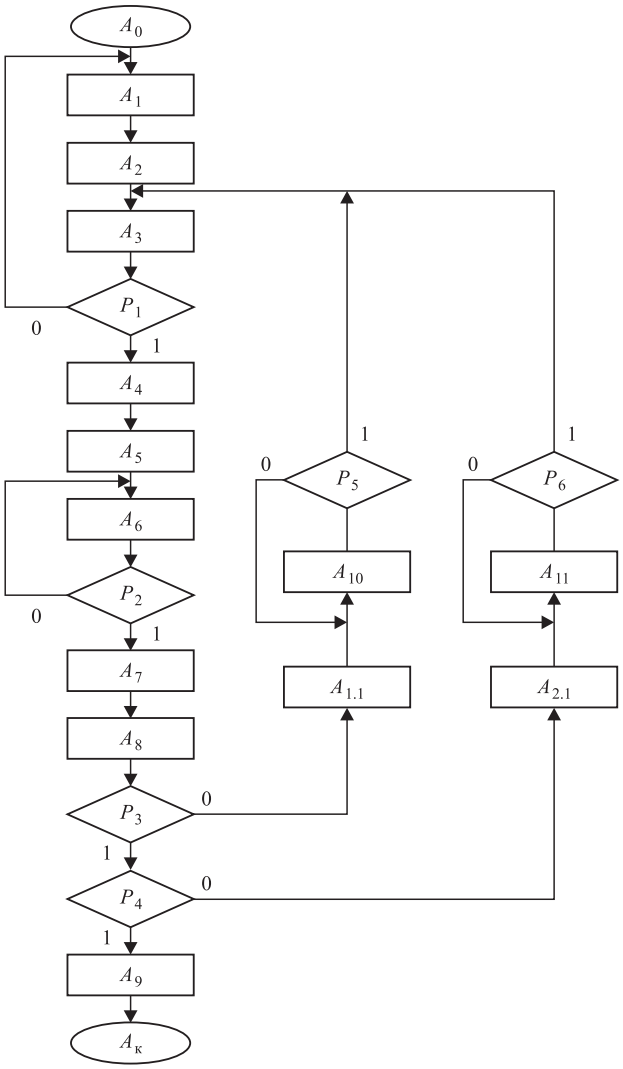


Рис. 2. Алгоритм функционирования системы поддержания концентрации воды в ВМЭ

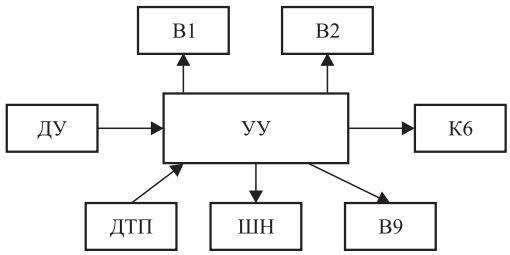


Рис. 3. Структурная схема управления системой поддержания параметров ВМЭ и топливоснабжения котла котельной

Логические условия: $P_1 = 0$, если объём ВМЭ в ёмкости *4* меньше 0,7*V* её объёма; $P_1 = 1$, если объём ВМЭ в ёмкости *4* больше 0,7*V* её объёма; $P_2 = 0$, если время перемешивания (t) меньше заданного времени ($t_{зад}$); $P_2 = 1$ — если время перемешивания (t) больше заданного времени ($t_{зад}$); $P_3 = 0$, если концентрация воды W в ВМЭ меньше 18 %; $P_3 = 1$ — если $W = 20 \pm 2$ %; $P_4 = 0$, если $W > 22$ %; $P_4 = 1$, если $W = 20 \pm 2$ %; $P_5 = 0$, если время подачи (t_1) меньше времени 0,5Δ (с), где Δ — время, требуемое для изменения концентрации воды на 1 %; $P_5 = 1$, если $t_1 \geqslant 0{,}5\Delta$; $P_6 = 0$, если время подачи компонента (t_2) меньше времени 0,5Δ; $P_6 = 1$, если $t_2 \geqslant 0{,}5\Delta$.

Структурная схема алгоритма последовательности операторов и логических условий функционирования системы поддержания концентрации воды в ВМЭ представлена на рис. 2.

Структурная схема управления системой поддержания параметров ВМЭ и топливоснабжения котла котельной представлена на рис. 3.

Основными элементами в данной схеме являются управляющее устройство (УУ), которое получает сигналы с датчиков и посылает соответствующие сигналы на исполнительные органы, ДУ — датчик уровня, ДТП — датчик технологического параметра, ШН — шестерённый насос, В1, В2, В9 — вентили, К6 — клапан. В схеме управления электроприводом используются бесконтактные переключающие устройства на логических элементах взамен электромагнитных контактных реле управления. На них формируются бесконтактные схемы, выполняющие логические функции управления, защиты и блокировок. Достоинством таких схем являются высокая надёжность, малые габариты, низкое энергопотребление.

Проточный анализатор (релаксометр) ЯМР. Из всех известных метод ЯМР-релаксометрии является единственным, контролирующим концентрацию воды, нефти и газа во всем диапазоне 0—100 %, а также такие важные характеристики ВМЭ, как дисперсность (распределение размеров капель воды) [6, 7]. Функциональная схема автоматической системы пробоотбора для анализа ВМЭ анализатором ЯМР (релаксометром) приведена на рис. 4. На рис. 5 представлена схема управления системой пробоотбора ВМЭ от контроллера STK500 ATMEGA 8515L.

Принцип проточного пробоотбора основан на уравнении Бернулли, согласно которому при неразрывности и однородности потока

изменения давление жидкости P_i в разных сечениях трубы S_i при скоростях v_i описывается уравнением:

$$P_i/\rho g + v_i^2/2g = \text{const}, \quad (1)$$

с учётом того, что расход Q_i постоянен ($Q_i = S_i v_i = \text{const}$).

Поток жидкости, попадая в расширение трубы, снижает скорость v и увеличивает давление P пропорционально $\sqrt{S}$. В результате происходит интенсивная турбулизация смеси, которая через входной патрубок поступает со скоростью v_i, определяемой положением патрубка, в датчик магнита ЯМР-анализатора и выходит через выходной патрубок, который может быть установлен в любом месте в трубе. В результате скорость потока будет определяться разницей давлений ($P_{\max} - P_i$) в сечении $S_{\max}$ и S_i. При расположении патрубка в позиции 1 в сечении конуса трубы разница давлений будет минимальна, независимо от скорости и давления в трубе, при этом скорость движения потока через датчик ЯМР будет также минимальной, что необходимо для измерения ЯМР-параметров (влажности, дисперсности капель воды) как бы "в остановленном" потоке. Тем самым отпадает необходимость реальной остановки потока. Конструктивно это означает отказ от вентилей и задвижек, не имеющих неограниченного ресурса.

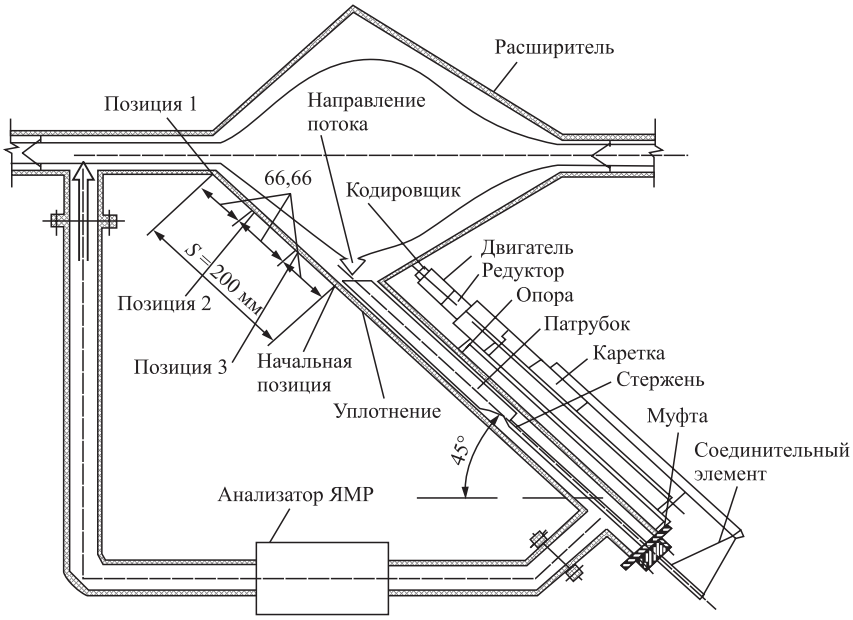


Рис. 4. Система поточного пробоотбора ВМЭ для датчика релаксометра ЯМР

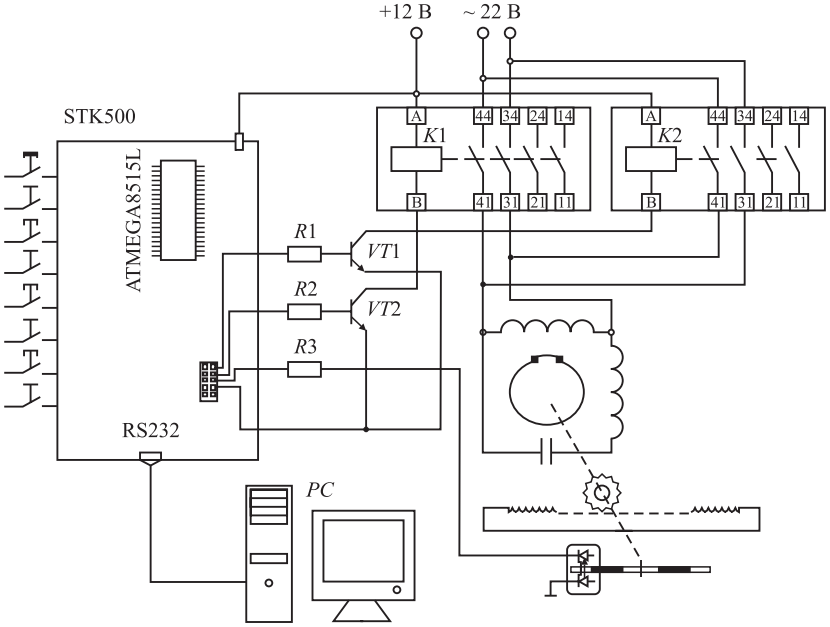


Рис. 5. Схема управления системой пробоотбора от контроллера STK500 ATMEGA 8515L:
M — электродвигатель; *C* — конденсатор; *PC* — компьютер; *VT1*, *VT2* — транзисторы

Для автоматизированного управления электроприводом, обеспечивающим перемещение патрубка, использован отладочный набор и система проектирования *STK*500 для *AVR* (Advanced Virtual RISK) микроконтроллеров фирмы Atmel, который поставляется с микроконтроллером *ATMEGA*8515*L* на панели с маркировкой *SCKT*3000*D*3 для управления системой пробоотбора (см. рис. 4, 5).

Программа в *ATMEGA8515L* выполняет следующие операции:

инициализацию микроконтроллера: инициализация портов *A*, *B*, *C*, *D*, *E*; таймера/счётчика, универсального синхронно/асинхронного приёмопередатчика (USART), дисплея VFD, внешнего прерывания INT0;

выдаёт сообщение "Текущее положение" на экране VFD;

переходит в подпрограмму сравнения принятого кода запуска.

После этого на компьютере следует вызвать основную программу управления элек-

троприводом перемещения патрубка. Появится окно интерфейса управления. Происходит конфигурирование последовательного порта VISA и ожидается появление команды "Пуск" для входа в основную подпрограмму. Перед запуском необходимо определить промежуточные положения останова электропривода и время ожидания при каждом останове. Расстояние, на которое патрубок должен переместиться, отсчитывается и задаётся с начального положения в миллиметрах (мм), а время ожидания — в секундах.

Для определения параметров ВМЭ проточным датчиком ЯМР используются экспериментально полученные зависимости [6, 7] между ЯМР-параметрами: временами спин-решеточной T_1, спин-спиновой T_2 релаксации, населённостями протонов $P_{1,2i}$ и параметрами ВМЭ. Рассмотрим процесс определения каждого из ВМЭ параметров.

Расход. Для измерения расхода входной патрубок располагается в сечении расширения трубы, обеспечивающем диапазон скоростей потока, для которого экспериментально получена зависимость значений скорости релаксации $(T_{2эф})^{-1}$ от скорости потока v (м/с) или расхода Q (л/ч), представленная для 20%-ной эмульсии на рис. 6 и описываемая уравнением:

$$(T_{2эф})^{-1} = (T_{2о})^{-1} + (\tau)^{-1}, \qquad (2)$$

где $T_{2эф}$ — измеряемое время релаксации потока; $T_{2о}$ — время релаксации неподвижной жидкости; τ — время пребывания жидкости в объёме катушки датчика.

Зависимости начальной амплитуды спин-эхо A(у.е.) и скорости релаксации $(T_2)^{-1}$ с коэффициентами корреляции $R^2 = 0{,}999$ и среднеквадратичными отклонениями $S = 0{,}526$ и $S = 0{,}62$ описываются полиномами:

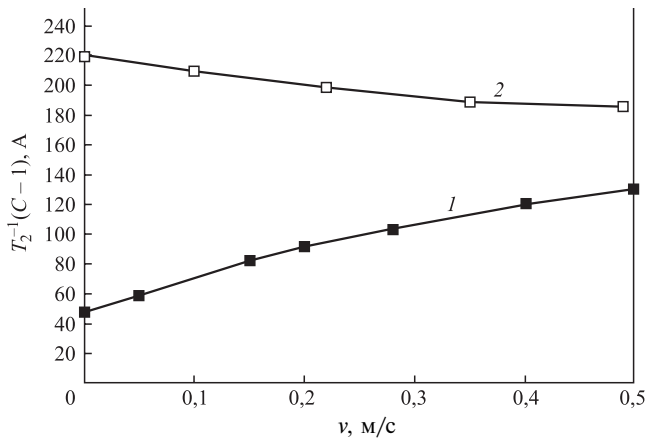


Рис. 6. Зависимость скорости релаксации $(T_{2эф})^{-1}$ (кривая *1*) и первой амплитуды спин-эхо *A* (кривая *2*) от скорости потока ВМЭ

$$A = 100{,}6v^2 - 120v + 220{,}4; \qquad (3)$$

$$(T_{2эф})^{-1} = -178v^2 + 253v + 47{,}7. \qquad (4)$$

Перемещением патрубка пробоотбора смещаем скорость потока ВМЭ в интервал $v = 0...0{,}5$ м/с, для которых получены экспериментальные зависимости между ЯМР-параметрами и скоростью потока. Из этих зависимостей, занесённых в базу данных компьютера и используя уравнения (5, 6), определяются значения скорости потока v и расхода Q:

$$v = K_C S(T_{2эф})^{-1}/KS_Д; \qquad (5)$$

$$Q = K_C S(T_{2эф})^{-1}, \qquad (6)$$

где $K = S/S_Д$ — коэффициент редукции; $S_Д$ и S — площади сечений трубки датчика ЯМР и трубы (на уровне положения патрубка в коническом расширении измерительной трубы); $K_С$ — коэффициент, зависящий от состава.

Расход Q_i отдельных компонент ВМЭ можно определить по формуле:

$$Q_i = QP_i, \qquad (7)$$

где P_i — концентрация i-й компоненты смеси, определяемая из огибающих эхо по методике Карра—Парселла—Мейбум—Гилла (КПМГ).

Концентрация воды в ВМЭ. Концентрацию воды W определяют предварительным измерением времен спин-спиновой релаксации чистой воды $T_{2В}$, мазута $T_{2М}$ и далее $T_{2эф}$ их смеси по начальным участкам огибающих эхо-сигналов, W определяется по формуле, представленной в [6]:

$$W = T_{2В}(T_{2эф} - T_{2М})100\ \%/T_{2эф}(T_{2В} - T_{2М}). \qquad (8)$$

Число 180°-ных импульсов N в методике измерения последовательностью КПМГ выбирают из формулы:

$$N = k3\rho_н - k4, \qquad (9)$$

что позволяет линеаризировать зависимость,

где $\rho_н$ — плотность мазута в кг/м^3; $k3$, $k4$ — коэффициенты, зависящие от вида нефтяного остатка.

Дисперсное распределение капель воды в ВМЭ. Интегральные параметры дисперсности капель воды: D_{CA} — среднеарифметический диаметр; D_{max} — диаметр, соответствующий максимуму дисперсного распределения, и $r_{3/2}$ — так называемый радиус три вторых (радиус Слэттера) могут быть определены импульсным ЯМР с коэффициентами регрессии R^2 = 0,95; 0,96 и 0,88 по формулам:

$$D_{CA} = 0{,}16\exp(2{,}85T_{1B}); \quad (10)$$

$$D_{max} = 0{,}32\exp(1{,}37T_{1B}); \quad (11)$$

$$r_{3/2} = 2{,}40(T_{1B})^{4{,}27}, \quad (12)$$

где T_{1B} — время спин-решёточной релаксации воды.

Определение этих параметров дисперсности важно для поддержания диаметра капель воды в ВМЭ на уровне 20...30 мкм, поскольку от этого зависит эффективность сжигания ВМЭ.

Заключение. Предложены: автоматическая схема управления процессом топливоснабжения котельной водомазутной эмульсией (ВМЭ), а также поддержания концентрации воды в ВМЭ; автоматическая система пробоотбора ВМЭ, позволяющая перемещением патрубка пробоотбора смещать скорость потока ВМЭ в интервал диапазона скоростей, для которых получены экспериментальные зависимости между ЯМР-параметрами и скоростью потока; методики контроля расхода, влажности и дисперсного распределения капель воды в ВМЭ по измерениям параметров ЯМР-релаксации.

Библиографические ссылки

1. **Кашаев Р.С., Малацион С.Ф., Самигуллин Ф.М., Матухин В.Л.** Температурная зависимость структурно-динамических параметров и методика экспресс-анализа топливных водобитумных эмульсий на основе метода ЯМР// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 11—12. С. 3—11.

2. **Javier, Norberdo, Cesar.** Combustion Characteristics of heavy Oil Water emulsions. Fuel 1995. V. 75. No 6. P. 695—705.

3. **Abu Zaid.** Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsions // Energy conversion and Management. 2004. № 45. P. 697—705.

4. **Sadrajad A., Hirotsugu F., Ali I.** Experimental study of exhaust emissions of W/O emulsion fuel in DI single cylinder disel engine // Modern Applied Science. 2011. V. 5. No 5.

5. **Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш.** Устройство для измерения состава и расхода многокомпонентных жидкостей методом ядерного магнитного резонанса. Патент России № 2544360. 20.03.2015. Бюл. № 8.

6. **Кашаев Р.С., Темников А.Н., Идиятуллин З.Ш.** Способ оперативного контроля качества нефти и нефтепродуктов // Патент России № 2519496. 24.12.2012. Бюл. № 16.

7. **Kashaev R.S.** Oil Disperse Systems Study Using Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry (NMRR). Advances in Energy Research. 2013. V.16. 68 p. E-book "Nova Science Publishers, Inc." ID 12590, N-Y. USA.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал "Автоматизация. Современные технологии"
успешно прошёл аккредитацию в ВАК для публикации работ
соискателей учёных степеней по отрасли науки:
05.00.00 — технические науки
и четырём группам специальностей:
05.02.00 — машиностроение и машиноведение;
05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;
05.11.00 — приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы;
05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.
Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!
С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

УДК 519.71

В.А. Кармишин, канд. техн. наук, проф., **М.В. Неменко**
(Московский государственный университет
информационных технологий, радиотехники и электроники)

nemomasha@mail.ru

ВЫБОР ТАКТА КВАНТОВАНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Сделана попытка оценить устойчивость системы с раздельным подходом для описания модели регулятора в дискретном виде, а объекта управления — в аналоговом. При использовании цифровых регуляторов замкнутая система моделируется и исследуется именно в таком виде. При этом для дискретного регулятора проведено двойное линейное преобразование, позволяющее перейти в плоскость переменной w, которая переводит окружность плоскости z в мнимую ось плоскости w. Поэтому замкнутая система исследуется на устойчивость в плоскости переменной w ≡ p. Кроме этого, проведена дискретизация всей системы с использованием метода Джури и получена граница устойчивости в плоскости: коэффициент усиления системы — такт квантования. Расчёты переходных функций для дискретного регулятора и аналогового объекта управления показали хорошее совпадение с полученной областью устойчивости.

Ключевые слова: цифровая система; элементная база; цифровой регулятор; аналоговый объект управления; квантование; пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование.

An attempt was made to evaluate the stability of the system with a separate approach for description the model regulator in the discrete form and controled object in the analog form. When using the digital regulators closed loop system is simulated and studied exactly in this form. At the same time the dual linear transformation is carried out for a discrete regulator, which allows to move in the plane of the variable w, which transforms the circle of the plane z to the imaginary axis of the plane w. Therefore, a closed system is studied for stability in the plane of the variable w ≡ p. In addition, the entire system sampling is carried out using the method Juri and the stability boundary in the plane: the system intensification factor — quantization cycle is obtained. Calculations of transition functions for digital regulator and controled analog object showed good agreement with the obtained stability region.

Key words: digital system; element date base; digital regulator; controled analog object; quantization; proportional-integral-differential regulation.

Завершается переход от аналоговых систем управления к цифровым системам управления. Современная элементная база бурно развивается и внедряется во все сферы технологических устройств, связанных с системами управления и средствами автоматизации [1—6]. Необходимость и обоснованность перехода к цифровым системам понятна и закономерна.

Теория цифровых систем развивалась на базе существовавшей теории аналоговых и импульсных систем, и только в настоящее время приобрела самостоятельный характер. Можно утверждать, что это две параллельные и, в некотором роде, зависимые ветви развития. При этом следует помнить, что большинство реальных объектов управления являются по своей физической природе аналоговыми. Следовательно, необходима реальная "стыковка" цифрового регулятора и аналогового объекта управления [7]. Поэтому идёт бурное развитие интерфейсов [8, 9], обеспечивающих качественную связь указанных основных компонентов реальных систем управления.

Сделана эмпирическая попытка связать в единую систему цифровой регулятор и аналоговый объект управления для решения вопроса устойчивости замкнутой системы. В имеющихся публикациях подобных попыток не обнаружено. Речь идёт о переходе дискретной передаточной функции регулятора с помощью преобразования Тастина в плоскость w с последующим рассмотрением её совместно с аналоговой передаточной функцией объекта управления.

Поскольку методов дискретизации передаточных функций регуляторов и объектов управления достаточно много, подробно рассмотрен лишь один метод.

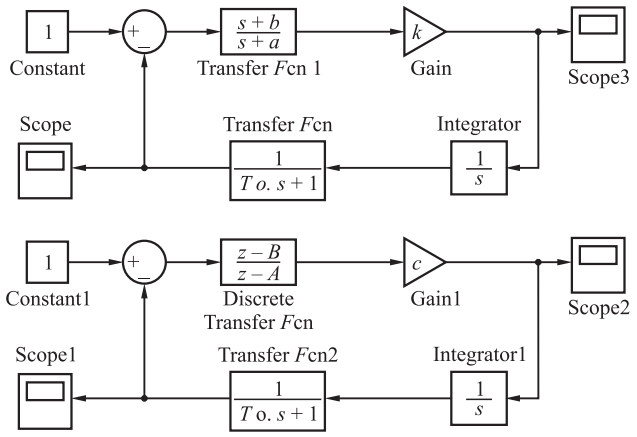


Рис. 1. Структурные схемы системы управления с аналоговым и дискретным регуляторами

В качестве примера взята достаточно простая система управления для того, чтобы проверить предлагаемую гипотезу.

На рис. 1 показана упрощённая, но близкая к реальной схема системы управления. В качестве объекта управления рассматривается одновальный турбореактивный двигатель (ТРД) [10], поэтому основной инерционностью объекта управления является инерционность раскрутки вала турбокомпрессора. Такая модель является линейной и не пригодна к исследованию динамики ТРД на пусковых режимах.

Регулятор описан передаточной функцией W_p:

$$W_p(p) = \frac{k_1\left(T_1 p + 1\right)}{\tau p + 1}, \qquad (1)$$

где k_1 — коэффициент усиления регулятора; T_1 — постоянная времени форсирующего звена; τ — постоянная времени регулятора; p — оператор Лапласа.

В свою очередь, объект управления

$$W_0(p) = \frac{k_0}{T_0 p + 1}, \qquad (2)$$

где W_0 — передаточная функция объекта управления; k_0 — коэффициент усиления объекта управления; T_0 — постоянная времени объекта управления.

Система астатическая, поскольку исполнительный механизм описан как идеальное интегрирующее звено:

$$W(p) = 1/p, \qquad (3)$$

где W — передаточная функция интегрирующего звена.

Закон управления регулятора — пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД).

Регулятор имеет два параллельных канала: пропорциональный и дифференциальный. При этом канал производной выполнен как реальное дифференцирующее звено, поэтому можно утверждать, что на входе системы по заданному воздействию включён фильтр низкой частоты для устранения высокочастотных помех на входе в систему.

Запишем характеристическое уравнение для аналоговой системы:

$$T_0 p^3 + (T_0 a + 1)p^2 + (k + a)p + kb = 0, \qquad (4)$$

где T_0 — постоянная времени объекта управления; a — полюс регулятора; k — коэффициент усиления регулятора; b — ноль регулятора.

Необходимое условие устойчивости выполняется для (4) при любых $k > 0$, а необходимое и достаточное условие

$$\Delta_2 = [T_0(a - b) + 1)]k + a(T_0 a + 1) > 0, \qquad (5)$$

где Δ_2 — определитель Гурвица, при $a > b$.

Таким образом, аналоговая система устойчива при любых реальных значениях коэффициентов регулятора.

Для получения дискретного преобразования Фурье (ДПФ) регулятора используем метод согласованного Z-преобразования и представим передаточную функцию (ПФ) регулятора (1) в виде:

$$W_p(p) = k\frac{p + b}{p + a}, \qquad (6)$$

где $k = k_1\frac{T_1}{\tau}$; $b = \frac{1}{T_1}$; $a = \frac{1}{\tau}$.

Реализуем метод для ПФ (6):

$$W\left(z\right) = c\frac{z - B}{z - A}, \qquad (7)$$

где z — оператор Z-преобразования; C — коэффициент усиления регулятора; B — ноль регулятора; $B = \exp(-bT)$; T — такт квантования по времени; A — полюс регулятора; $A = \exp(-aT)$.

Приравняем ПФ (6) при $p = 0$ к ПФ (7) при $z = 1$, получим:

$$k\frac{b}{a} = C\frac{1 - B}{1 - A}. \qquad (8)$$

Если требуется, чтобы регулятор обеспечил запас по фазе 45° на частоте 125 $с^{-1}$, то в соответствии с утверждением в работе [5], частота среза $\omega_c = \sqrt{ab}$, поэтому выбираем a = 300 и b = 50.

Коэффициент усиления k = 5 при $\omega_c = 125^{-1}$ выбираем $|W_p(j\omega)W_0(j\omega)| = 1$, здесь $W_p(j\omega)$ и $W_0(j\omega)$ — амплитудно-фазовые частотные характеристики регулятора и объекта управления соответственно. По соотношению (8) определяем C для заданного такта квантования Т и заданных a и b.

Таким образом, структурная схема системы с цифровым регулятором будет иметь вид, показанный на рис. 1.

В полученную ДПФ регулятора (7) подставим $z = \frac{1+w}{1-w}$, которая обеспечит конформное преобразование плоскости z в плоскость w, т. е. преобразование Тастина. При этом корни из плоскости единичного круга переводятся в левую полуплоскость, если система устойчива.

Получим ПФ регулятора:

$$W_p(w) = C\frac{\frac{1+w}{1-w}+b}{\frac{1+w}{1-w}+a}. \qquad (9)$$

Для получения характеристического уравнения рассмотрим ПФ замкнутой системы при условии $p \equiv w$:

$$[T_0(1 + A)w^2 + (1 + A + T_0(1 - A))w^2 + \\ + (1 - A + C(1 + B))w + C(1 - B)] = 0. \quad (10)$$

Постоянная времени объекта управления T_0 = 3 с, остальные коэффициенты использованы по описанным ранее соотношениям. В данном случае из рассмотрения полностью выпадает формирователь импульсов нулевого порядка, который необходимо поставить пред объектом управления.

Необходимые условия для уравнения (10) также выполняются, поскольку A и B меньше единицы.

Необходимое и достаточное условие для уравнения (10) выполняется, если

$$\Delta_2 = [(C(1 + B) + 1 - A)(1 + A + \\ + T_0(1 - A) - T_0(1 + A)C(1 - B)] > 0. \quad (11)$$

Соотношения (4), (5), (10) и (11) получены по программам расчёта полиномов в символическом виде.

Для выявления значения такта квантования Т, не обеспечивающего устойчивости замкнутой системы, была составлена программа, которая фиксировала появление корней характеристического уравнения в левой полуплоскости с контролем по знакам коэффициентов и главных миноров определителя Гурвица.

Для выбранного k = 5 такт квантования не влияет на устойчивость системы, т. е. система устойчива при любых тактах квантования (Т = 1...100). В рассматриваемом случае не учитывалась задержка формирователя импульсов нулевого порядка, поэтому система осталась абсолютно устойчивой. В результате не получено никакой полезной информации по выбору такта квантования.

Далее рассмотрим передаточную функцию формирователя импульсов в следующем виде:

$$HW(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}, \qquad (12)$$

где $HW(p)$ — передаточная функция экстраполятора нулевого порядка.

Передаточную функцию интегрирующего звена запишем в виде

$$W(z) = \frac{T}{z-1}. \qquad (13)$$

Подставим (12) и (13) в передаточную функцию замкнутой системы с учётом оператора Z-преобразования $z = e^{pT}$, а затем заменим $z = \frac{1+w}{1-w}$ и получим характеристическое уравнение замкнутой системы при условии $p \equiv w$:

$$T_0(1 + A)p^4 + (1 + A + 2T_0)p^3 + \\ + (T_0(1 - A) - TC(B + 1) + 2)p^2 + \\ + (2TCB + 1 - A)p + TC(1 - B) = 0. \quad (14)$$

Для k = 5, a = 300 и b = 50 с учётом ранее используемых формул для A, B и C, значение такта квантования Т = 0,6 с обеспечивает устойчивость системы. При больших тактах квантования система неустойчива.

Если провести дискретизацию системы полностью, т. е. вместе с объектом управления, то получим передаточную функцию разомкнутой системы в виде:

$$W_{раз}(z) = C\frac{(z-B)}{(z-A)}\frac{(b_1z + b_2)}{(z^2 + a_1z + a_2)}, \qquad (15)$$

где a_1, a_2 — коэффициенты полинома знаменателя дискретной передаточной функции; b_1, b_2 — коэффициенты полинома числителя дискретной передаточной функции.

При этом дискретизация проведена с учётом включения перед объектом управления фиксатора нулевого порядка.

Определим характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$z^3 + (Cb_1 - A + a_1)z^2 + (-Aa_1 - CBb_1 + Cb_2 + a_2)z - Aa_2 - CBb_2 = 0. \quad (16)$$

Обозначим

$$c_1 = Cb_1 - A + a_1,$$
$$c_2 = -Aa_1 - CBb_1 + Cb_2 + a_2,$$
$$c_3 = -Aa_2 - CBb_2.$$

Полученное характеристическое уравнение исследовалось на устойчивость методом Джури, для этого составлена программа и проведены расчёты, результаты которых представлены в виде графика на рис. 2.

График построен по следующим табличным значениям:

k = [100; 50; 35; 25; 20; 15; 10; 7; 5; 3],

T = [0,125; 0,25; 0,35; 0,45; 0,59; 0,85; 1,25; 1,95; 2,85; 5,75].

Приведённые табличные значения фиксируют границу области устойчивости дискретной системы (она расположена ниже показанной на рис. 2 кривой). По сравнению с областью устойчивости аналоговой системы, область устойчивости дискретной — значительно меньше.

Можно утверждать, что предложенный метод упрощённого рассмотрения системы с дискретизацией только регулятора (14) существенно уменьшает область устойчивости системы в плоскости $k = f$(T). Это следует из графика, представленного на рис. 2.

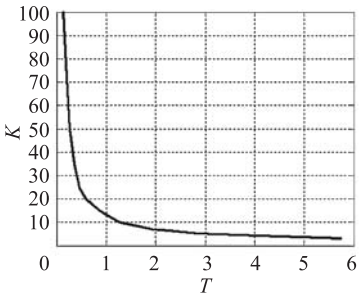


Рис. 2. Граница устойчивости системы в плоскости $k = f$(T)

Для более объективной оценки проведённых расчётов составлена программа расчёта переходных функций замкнутой системы с дискретным регулятором и аналоговым объектом управления. Уравнения объекта управления интегрировались методом Рунге—Кутта четвёртого порядка, а уравнения регулятора решались разностными методами. Перед объектом управления был включён экстраполятор нулевого порядка. Проверялись пары точек графика на рис. 2 в устойчивой и неустойчивой зонах. Приведём один из примеров, полученных описанными методами.

На рис. 3, *а* и 4, *а* представлены переходные функции в замкнутой системе, полученные для коэффициента усиления k = 100 и такта квантования T = 0,1 с. Переходные процессы имеют устойчивый характер.

На рис. 3, *б* и 4, *б* показаны переходные функции в замкнутой системе, полученные для коэффициента усиления k = 100 и такта квантования T = 0,2 с. Переходные процессы имеют неустойчивый характер.

Аналогичным образом рассмотрены и показаны переходные процессы для правой ветви гиперболы $k = f$(T), т. е. для k = 5 и T = 3 с и T = 2 с, соответственно рис. 3, *в*, 4, *в* и рис. 3, *г*, 4, *г*.

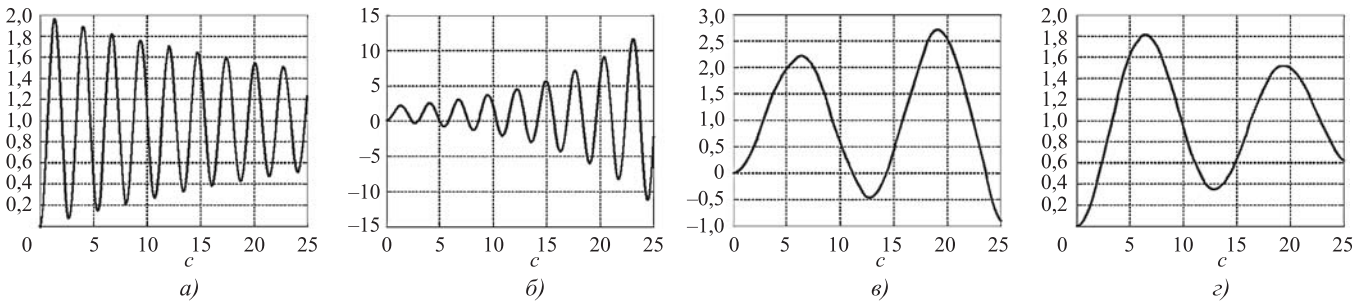


Рис. 3. Переходная функция по регулируемому параметру:
а — при k = 100 и T = 0,1 с; *б* — при k = 100 и T = 0,2 с; *в* — при k = 5 и T = 3 с; *г* — при k = 5 и T = 2 с

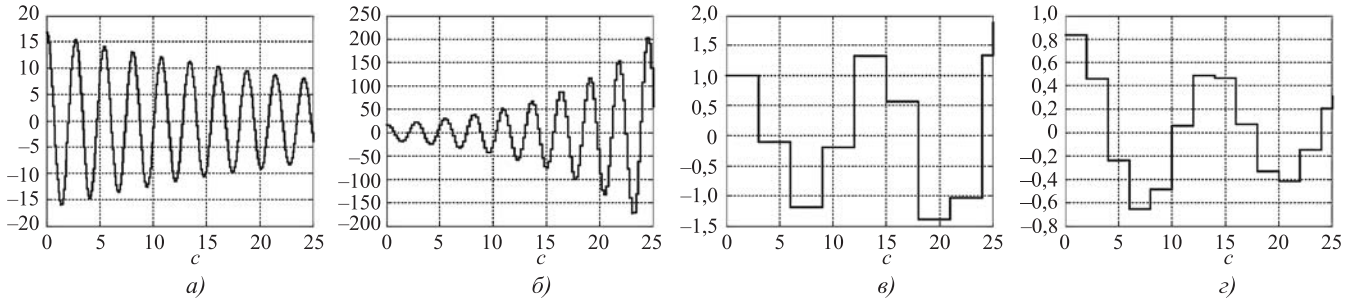


Рис. 4. Переходная функция по управлению:
а — при k = 100 и Т = 0,1 с; *б* — при k = 100 и Т = 0,2 с; *в* — при k = 5 и Т = 3 с; *г* — при k = 5 и Т = 2 с

Выбраны параметры, близкие к граничным значениям параболы, поскольку в левой части гиперболы резко изменяется коэффициент усиления, а в правой части — такт квантования. Выбор коэффициента усиления и такта квантования в указанных диапазонах является более наглядным и оправданным.

На рис. 3, *в* и 4, *в* показаны графики переходных процессов неустойчивой системы, а на рис. 3, *г* и 4, *г* — графики переходных процессов устойчивой системы.

Все переходные процессы вполне согласуются с графиком на рис. 2 для выбранных значений k и Т.

Наиболее достоверные результаты по выбору коэффициентов усиления и такта квантования позволяют получить непосредственные расчёты переходных процессов для замкнутой системы. При этом регулятор используется в дискретном виде, а объект управления — в аналоговом.

Заключение. Результаты исследования могут использоваться не только для объектов управления типа ТРД, но и для прецизионной робототехники, в частности при проектировании биомеханических систем захвата [6, 11], где в условиях нечёткой информации об условиях контакта предмета с опорной поверхностью и его геометрической форме решается актуальная задача захвата этого предмета с высокой степенью точности без остаточной деформации на самом предмете. Кроме того, важным является определение условий нахождения действия между событием обнаружения предмета в поисковом движении и событием фиксации предмета, при котором устраняется возможность потери устойчивости предмета.

Библиографические ссылки

1. **Чижиков В.И.** Управление упругим кинематическим соединением бесшарнирного манипулятора // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 7. С. 3—8.

2. **Холопов В.А., Руднева Л.Ю.** Особенности автоматизированной технологии сборки специальных изделий // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14. № 4. С. 183—186.

3. **Кушнир А.П.** Исследование динамических процессов в уплотнительных устройствах мехатронных шпиндельных узлов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 64—68.

4. **Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П.** Устройства гидроструйной обработки новых поколений // Науч. тр. IV Межд. научн. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»: сб. науч. тр. М.: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 24—27.

5. **Дорф Р.К., Бишоп Р.Х.** Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. 832 с.

6. **Чижиков В.И., Курнасов Е.В.** Захват пальцами протеза предмета с нечёткой геометрической характеристикой в условиях его статической неустойчивости // Вестник МГТУ МИРЭА: сб. науч. тр. Вып. № 3. Т. 1. М.: МИРЭА, 2015. С. 269—282.

7. **Кармишин В.А.** Цифровые системы управления. М.: МГУПИ, 2011.

8. **Бугров Ю.Н., Курнасов Е.В.** Преобразование аналоговых сигналов на основе цифровых процессоров и микроконтроллеров в интерфейсе многоканальных датчиков // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 3. С. 13—19.

9. **Бугров Ю.Н., Курнасов Е.В.** АЦП параллельного типа с преобразованием двоично-десятичных чисел в двоичный код для интерфейса управляющих устройств // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 8. С. 9—14.

10. **Шевяков А.А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. М.: Машиностроение, 1965. 552 с.

11. **Чижиков В.И., Курнасов Е.В.** Синтез системы автоматического управления стабилизацией усилия захвата предмета с нечёткой геометрической характеристикой // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 2. С. 3—10.

УДК 681.51

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, акад. РАН, **Н.Е. Зубов,** д-р техн. наук,
В.Н. Рябченко, д-р техн. наук, **М.Н. Поклад,** канд. техн. наук, **Д.Е. Ефанов**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ОАО РКК "Энергия", г. Королёв)
Nikolay.Zubov@rsce.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ОДНОВИНТОВОГО ВЕРТОЛЁТА

Для линеаризованной модели продольного движения одновинтового вертолёта четвёртого порядка получены аналитические выражения законов управления. В основу синтеза положены оригинальная декомпозиция объекта управления и разработанный ранее авторами на её основе метод модального управления по состоянию MIMO-системой. Метод не требует решения специальных матричных уравнений (типа уравнения Сильвестра), имеет один и тот же вид для непрерывного и дискретного случаев задания модели системы, не имеет ограничений по алгебраической и геометрической кратности задаваемых полюсов, легко реализуется в среде MATLAB. Приведены результаты численного моделирования управления продольным движением одновинтового вертолёта с использованием аналитически синтезированных законов управления, которые представляют собой графики переходных процессов и управляющих воздействий.

Ключевые слова: декомпозиция; модальный синтез; MIMO-система; продольное движение одновинтового вертолёта; полюса динамической системы.

The control laws analytical expressions are receive for the linearized model of longitudinal motion of single-rotor helicopter fourth-order. The original decomposition of the object control and modal control method according to MIMO system state which is previously developed by the authors on its basis is assumed as basis of synthesis. The method does not require special solutions of matrix equations (equations like Sylvester), has the same kind for continuous and discrete cases of the model system setting, has no restrictions on algebraic and geometric multiplicity given by the poles, is easy implemented in MATLAB medium. The results control numerical modeling results of the single-rotor helicopter longitudinal movement by using the analytically synthesized control laws, which represent graphs of transients processes and control actions are adduced.

Keywords: decomposition; modal synthesis; MIMO-system; longitudinal movement of the single-rotor helicopter; poles of the dynamic system.

Введение. В практике синтеза законов управления одновинтовых вертолётов (ОВ) принят подход разделения их пространственного движения на продольное и поперечное. При этом, как правило, используются линейные стационарные числовые модели, временной интервал применения которых существенно ограничен. В этом случае для обеспечения требуемой точности управления на всем интервале движения ОВ необходимо применять короткие периоды линеаризации, которые не должны превышать длительность одного или нескольких тактов работы бортовых компьютеров. Такой подход, несомненно, требует решения задачи синтеза в масштабе реального времени. Осуществить его наиболее просто, если иметь аналитические выражения законов управления, полученные в общем виде. Решению данной проблемы для задачи управления продольным движением ОВ посвящена эта работа.

Математическая модель продольного движения ОВ. Объект управления будем рассматривать в виде матричного уравнения полного продольного движения ОВ в форме "вход—состояние" [1, 2] типа

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \qquad (1)$$

с матрицами коэффициентов

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{V_x}^{V_x} & a_{V_x}^{V_y} & a_{V_x}^{\omega_z} & a_{V_x}^{\upsilon} \\ a_{V_y}^{V_x} & a_{V_y}^{V_y} & a_{V_y}^{\omega_z} & a_{V_y}^{\upsilon} \\ a_{\omega_z}^{V_x} & a_{\omega_z}^{V_y} & a_{\omega_z}^{\omega_z} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{V_x}^{u_x} & b_{V_x}^{u_{\text{о.ш}}} \\ b_{V_y}^{u_x} & b_{V_y}^{u_{\text{о.ш}}} \\ b_{\omega_z}^{u_x} & b_{\omega_z}^{u_{\text{о.ш}}} \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

элементы которых являются кусочно-постоянными величинами, и векторами

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \\ \Delta\omega_z \\ \Delta\upsilon \end{pmatrix}; \ \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_{\text{о.ш}} \end{pmatrix}.$$

В приведённых выражениях ΔV_x — отклонение от заданного значения продольной скорости; ΔV_y — отклонение от заданного значения вертикальной скорости; $\Delta\omega_z$ — отклонение от заданного значения угловой скорости тангажа; $\Delta\upsilon$ — отклонение от заданного значения угла тангажа; Δu_x — угол отклонения конуса несущего винта в продольном направлении; $\Delta u_{\text{о.ш}}$ — отклонение общего шага несущего винта; $a_{V_x}^{V_x}, a_{V_x}^{V_y}, a_{V_x}^{\omega_z}, a_{V_x}^{\upsilon}, a_{V_y}^{V_x}, a_{V_y}^{V_y}, a_{V_y}^{\omega_z}, a_{V_y}^{\upsilon}, a_{\omega_z}^{V_x}, a_{\omega_z}^{V_y}, a_{\omega_z}^{\omega_z}, b_{V_x}^{u_x}, b_{V_x}^{u_{\text{о.ш}}}, b_{V_y}^{u_x}, b_{V_y}^{u_{\text{о.ш}}}, b_{\omega_z}^{u_x}, b_{\omega_z}^{u_{\text{о.ш}}}$ — коэффициенты линеаризации [1, 2].

Введем для краткости записи обозначения

$a_{11} = a_{V_x}^{V_x}$; $a_{12} = a_{V_x}^{V_y}$; $a_{13} = a_{V_x}^{\omega_z}$; $a_{14} = a_{V_x}^{\upsilon}$;

$a_{21} = a_{V_y}^{V_x}$; $a_{22} = a_{V_y}^{V_y}$; $a_{23} = a_{V_y}^{\omega_z}$; $a_{24} = a_{V_y}^{\upsilon}$;

$a_{31} = a_{\omega_z}^{V_x}$; $a_{32} = a_{\omega_z}^{V_y}$; $a_{33} = a_{\omega_z}^{\omega_z}$;

$b_{11} = b_{V_x}^{u_x}$; $b_{12} = b_{V_x}^{u_{\text{о.ш}}}$; $b_{21} = b_{V_y}^{u_x}$; $b_{22} = b_{V_y}^{u_{\text{о.ш}}}$;

$b_{31} = b_{\omega_z}^{u_x}$; $b_{32} = b_{\omega_z}^{u_{\text{о.ш}}}$,

тогда объект управления (1) в развернутом виде запишется так:

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{V}_x \\ \Delta\dot{V}_y \\ \Delta\dot{\omega}_z \\ \Delta\dot{\upsilon} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \\ \Delta\omega_z \\ \Delta\upsilon \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_{\text{о.ш}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Считая все компоненты вектора состояния полностью наблюдаемыми, будем искать управление для модели (2) в виде закона обратной связи вида

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (3)$$

где $\mathbf{K}$ — искомая матрица коэффициентов (матрица регулятора).

Задача размещения полюсов. Как отмечалось в [3—6], задача размещения полюсов, или задача назначения собственных значений (eigenvalue assignment), в линейных динамических системах в той или иной постановке рассматривалась в многочисленных работах. В общем случае вместо системы (1) рассмотрим линейную многомерную динамическую систему со многими входами и многими выходами (MIMO — Multi Inputs Multi Outputs)

$$\mathfrak{D}\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (4)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ — вектор управляющих воздействий; n, r — размерности векторов состояния и управления соответственно; $\mathfrak{D}$ — оператор дифференцирования по времени, $\mathfrak{D}\mathbf{x}(t) = \dot{\mathbf{x}}(t)$, либо оператор сдвига во времени, $\mathfrak{D}\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t+1)$.

Аналогично (3) считаем, что для MIMO-системы (4) рассматривается управление с обратной связью

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad (5)$$

где $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{r\times n}$ — постоянная матрица регулятора.

Кроме того, предполагается, что матрица $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n\times r}$ в (4) имеет полный ранг по столбцам, а матрица $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n\times n}$ имеет множество собственных значений (спектр), определённое следующим образом:

$$\text{eig}(\mathbf{A}) = \{\lambda \in \mathbb{C}: \det(\lambda\mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = 0\},$$

где $\mathbf{I}_n$ — единичная матрица размера $n \times n$; $\mathbb{C}$ — множество комплексных чисел области стабилизации $\mathbb{C}^{\text{stab}}$, в зависимости от типа $\mathfrak{D}\mathbf{x}(t)$ обозначает левую полуплоскость $\mathbb{C}^-$ плоскости $\mathbb{C}$, т.е. $\mathbb{C}^{\text{stab}} \doteq \mathbb{C}^-$, либо область внутри круга единичного радиуса с центром в нуле, т.е. $\mathbb{C}^{\text{stab}} \doteq \mathbb{C}_{|\lambda|<1}$; $|\lambda|$ — модуль собственного значения λ.

Управление системой (4) с помощью законов (5) является классической задачей, когда необходимо найти матрицу $\mathbf{K}$, обеспечивающую некоторые заданные требования к процессу управления. Эти требования условно можно разделить на три группы [4—6]:

требования на размещение полюсов замкнутой системы (собственных значений матриц $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$) в заданных точках $\mathbb{C}^{\text{stab}}$ или в заданной области $\mathbb{C}^{\text{stab}}$ (заданной областью, например, может быть вся левая полуплоскость $\mathbb{C}$);

требования на размещение полюсов и нулей (тех или иных нулей передаточной матрицы MIMO-системы) замкнутой системы в заданных точках $\mathbb{C}^{\text{stab}}$ или заданных областях $\mathbb{C}^{\text{stab}}$;

требования к переходным процессам в замкнутой системе в смысле минимума заданного функционала.

В [4—6] предложен эффективный метод решения задачи полного размещения полюсов MIMO-системы (4). Он не требует решения специальных матричных уравнений (типа уравнения Сильвестра), имеет один и тот же вид для непрерывного и дискретного случаев задания модели системы, не имеет ограничений по алгебраической и геометрической кратности задаваемых полюсов, легко реализуется в среде MATLAB.

Пусть $\mathbf{B}^{\perp\mathrm{T}} = \mathrm{null}(\mathbf{B}^{\mathrm{T}})$ — ортогональный делитель нуля, т.е. матрица, удовлетворяющая условиям [4]

$$\mathbf{B}^{\perp}\mathbf{B} = \mathbf{0}_{(n-r)\times r}, \tag{6}$$

$$\mathbf{B}^{\perp}\mathbf{B}^{\perp\mathrm{T}} = \mathbf{I}_{n-r}; \tag{7}$$

$\mathbf{B}^{+}$ — псевдообратная матрица Мура—Пенроуза, т.е. $\mathbf{B}\mathbf{B}^{+}\mathbf{B} = \mathbf{B}$, $\mathbf{B}^{+}\mathbf{B}\mathbf{B}^{+} = \mathbf{B}^{+}$, $(\mathbf{B}^{+}\mathbf{B})^{\mathrm{T}} = \mathbf{B}^{+}\mathbf{B}$, $(\mathbf{B}\mathbf{B}^{+})^{\mathrm{T}} = \mathbf{B}\mathbf{B}^{+}$; $\mathrm{null}(\cdot)$ — оператор вычисления базиса нуль-пространства [3]; $\mathbf{0}_{(n-r)\times r}$ — нулевая матрица размера $(n-r)\times r$.

Определим $L = \mathrm{floor}(n/r)$, где floor(*) — операция округления числа * в сторону ближайшего целого в меньшую сторону, например floor(0,1) = 0, floor(1,4) = 1, floor(2,99) = 2 и т.д. Введем в рассмотрение многоуровневую декомпозицию MIMO-системы (4) аналогично тому, как это сделано в [4]. Для представляемой парой матриц ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$) MIMO-системы имеем:

нулевой (исходный) уровень декомпозиции

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A};\ \mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_0; \tag{8}$$

первый уровень декомпозиции

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp}\mathbf{A}_0\mathbf{B}_0^{\perp+};\ \ \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp}\mathbf{A}_0\mathbf{B}_0; \tag{9}$$

k-й (промежуточный) уровень декомпозиции

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{B}_{k-1}^{\perp}\mathbf{A}_{k-1}\mathbf{B}_{k-1}^{\perp+};\ \ \mathbf{B}_k = \mathbf{B}_{k-1}^{\perp}\mathbf{A}_{k-1}\mathbf{B}_{k-1}; \tag{10}$$

L-й (конечный) уровень декомпозиции

$$\mathbf{A}_L = \mathbf{B}_{L-1}^{\perp}\mathbf{A}_{L-1}\mathbf{B}_{L-1}^{\perp+};\ \mathbf{B}_L = \mathbf{B}_{L-1}^{\perp}\mathbf{A}_{L-1}\mathbf{B}_{L-1}. \tag{11}$$

Справедлива теорема 1 [4]. Если MIMO-система (4) с парой матриц ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$) полностью управляема, то полностью управляемы все пары матриц ($\mathbf{A}_i$, $\mathbf{B}_i$) (8)...(11), где $i \in \{0, ..., L\}$.

Без ограничения общности в дальнейшем будем считать, что все матрицы $\mathbf{B}_i$ в (8)...(11) являются матрицами полного ранга по столбцам. В противном случае можно воспользоваться подходом, изложенным в [4, 5]. Тогда справедлива теорема 2 [4]. Пусть MIMO-система (4) полностью управляема и матрица $\boldsymbol{K} \in \mathbb{R}^{r\times m}$ удовлетворяет формулам

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{K}_0 = \boldsymbol{B}_0^{-}\boldsymbol{A} - \boldsymbol{\Phi}_0\boldsymbol{B}_0^{-};\ \boldsymbol{B}_0^{-} = \boldsymbol{K}_1\boldsymbol{B}_0^{\perp} + \boldsymbol{B}_0^{+}, \tag{12}$$

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{B}_1^{-}\mathbf{A}_1 - \boldsymbol{\Phi}_1\mathbf{B}_1^{-};\ \boldsymbol{B}_1^{-} = \mathbf{K}_2\mathbf{B}_1^{\perp} + \mathbf{B}_1^{+}, \ldots, \tag{13}$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{B}_k^{-}\mathbf{A}_k - \boldsymbol{\Phi}_k\mathbf{B}_k^{-};\ \mathbf{B}_k^{-} = \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{B}_k^{\perp} + \mathbf{B}_k^{+}, \ldots, \tag{14}$$

$$\mathbf{K}_L = \mathbf{B}_L^{-}\mathbf{A}_L - \boldsymbol{\Phi}_L\mathbf{B}_L^{-}, \tag{15}$$

тогда

$$\mathrm{eig}\left(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}\right) = \bigcup_{i=1}^{L+1} \mathrm{eig}(\boldsymbol{\Phi}_{i-1}). \tag{16}$$

Из теоремы 2 следует, что закон управления (5) с матрицей $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{r\times n}$, удовлетворяющей соотношениям (12)...(15), обеспечивает выполнение условия (16), т.е. заданного размещения полюсов.

Аналитический синтез законов управления. В соответствии с изложенным введём в рассмотрение двухуровневую декомпозицию системы (2), поскольку $L = \mathrm{floor}(n/r) = 2$, учитывая, что в нашем случае ранг каждой из вводимых матриц $\mathbf{B}_0$ и $\mathbf{B}_1$ совпадает с соответствующим числом столбцов:

нулевой уровень

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$
$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \tag{17}$$

первый уровень

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp}\mathbf{A}_0\mathbf{B}_0^{\perp+};\ \ \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp}\mathbf{A}_0\mathbf{B}_0, \tag{18}$$

где $\mathbf{B}_0^{\perp+}$ — псевдообратная матрица Мура—Пенроуза для $\mathbf{B}_0^{\perp}$ [3].

Зададим матрицы $\mathbf{\Phi} = \mathbf{\Phi}_0$, $\mathbf{\Phi}_1$ таким образом, чтобы множество $\bigcup_{i=1}^{2} \mathrm{eig}(\Phi_{i-1})$ состояло из корней характеристического полинома $\det(\lambda\mathbf{I}_4 - \mathbf{A} + \mathbf{BK})$, например

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{\Phi}_0 = \begin{pmatrix} f_{11} & 0 \\ 0 & f_{12} \end{pmatrix}; \ \mathbf{\Phi}_1 = \begin{pmatrix} f_{21} & 0 \\ 0 & f_{22} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Тогда требуемая матрица коэффициентов в законе управления согласно (12) определится выражением

$$\mathbf{K} = \mathbf{\Phi}_0 \left(\mathbf{B}_0^+ + \mathbf{K}_1\mathbf{B}_0^\perp\right) - \left(\mathbf{B}_0^+ + \mathbf{K}_1\mathbf{B}_0^\perp\right)\mathbf{A}_0, \quad (20)$$

где

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{\Phi}_1\mathbf{B}_1^+ - \mathbf{B}_1^+\mathbf{A}_1; \quad (21)$$

$\mathbf{B}_0^+, \mathbf{B}_1^+$ — соответствующие псевдообратные матрицы Мура—Пенроуза [3, 4].

Для матрицы $\mathbf{B}$ вида (3) $\mathbf{B}_0^\perp$ и $\mathbf{B}_0^+$ определяются так:

$$\mathbf{B}_0^\perp = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_0^+ = \begin{pmatrix} b_{11}^+ & b_{12}^+ & b_{13}^+ & 0 \\ b_{21}^+ & b_{22}^+ & b_{23}^+ & 0 \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где

$$l_{11} = \frac{b_{21}b_{32} - b_{22}b_{31}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}; \ l_{12} = -\frac{b_{11}b_{32} - b_{12}b_{31}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}};$$

$$b_{11}^+ = \frac{b_{11}b_{22}^2 - b_{12}b_{21}b_{22} + b_{11}b_{32}^2 - b_{12}b_{31}b_{32}}{b^+};$$

$$b_{12}^+ = \frac{b_{21}b_{12}^2 - b_{11}b_{22}b_{12} + b_{21}b_{32}^2 - b_{22}b_{31}b_{32}}{b^+};$$

$$b_{13}^+ = \frac{b_{31}b_{12}^2 - b_{11}b_{32}b_{12} + b_{31}b_{22}^2 - b_{21}b_{32}b_{22}}{b^+};$$

$$b_{21}^+ = \frac{b_{12}b_{21}^2 - b_{11}b_{22}b_{21} + b_{12}b_{31}^2 - b_{11}b_{32}b_{31}}{b^+};$$

$$b_{22}^+ = \frac{b_{22}b_{11}^2 - b_{12}b_{21}b_{11} + b_{22}b_{31}^2 - b_{21}b_{32}b_{31}}{b^+};$$

$$b_{23}^+ = \frac{b_{32}b_{11}^2 - b_{12}b_{31}b_{11} + b_{32}b_{21}^2 - b_{22}b_{31}b_{21}}{b^+};$$

$$b^+ = b_{11}^2b_{22}^2 + b_{11}^2b_{32}^2 - 2b_{11}b_{12}b_{21}b_{22} - 2b_{11}b_{12}b_{31}b_{32} + b_{12}^2b_{21}^2 + b_{12}^2b_{31}^2 + b_{21}^2b_{32}^2 - 2b_{21}b_{22}b_{31}b_{32} + b_{22}^2b_{31}^2.$$

При этом матрицы $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{B}_1$ в соответствии с (9) определены как

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 \\ a_{21}^1 & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} b_{11}^1 & b_{12}^1 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где

$$a_{11}^1 = \frac{a_{33} + a_{13}l_{11} + a_{23}l_{12} + a_{31}l_{11} + a_{32}l_{12} + a_{11}l_{11}^2 + a_{22}l_{12}^2 + a_{12}l_{11}l_{12} + a_{21}l_{11}l_{12}}{l_{11}^2 + l_{12}^2 + 1};$$

$$a_{12}^1 = a_{14}l_{11} + a_{24}l_{12}; \ a_{21} = \frac{1}{l_{11}^2 + l_{12}^2 + 1};$$

$$b_{11}^1 = b_{11}(a_{31} + a_{11}l_{11} + a_{21}l_{12}) + b_{21}(a_{32} + a_{12}l_{11} + a_{22}l_{12}) + b_{31}(a_{33} + a_{13}l_{11} + a_{23}l_{12});$$

$$b_{12}^1 = b_{12}(a_{31} + a_{11}l_{11} + a_{21}l_{12}) + b_{22}(a_{32} + a_{12}l_{11} + a_{22}l_{12}) + b_{32}(a_{33} + a_{13}l_{11} + a_{23}l_{12});$$

$$b_{21}^1 = b_{31}; \ b_{22}^1 = b_{32}.$$

Вычисляя $\mathbf{B}_1^+$ для первого уровня декомпозиции, имеем

$$\mathbf{B}_1^+ = \begin{pmatrix} b_{11}^{1+} & b_{12}^{1+} \\ b_{21}^{1+} & b_{22}^{1+} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где

$$b_{11}^{1+} = \frac{b_{22}^1}{b^{+*}}; \ b_{12}^{1+} = -\frac{b_{12}^1}{b^{+*}}; \ b_{21}^{1+} = -\frac{b_{21}^1}{b^{+*}}; \ b_{22}^{1+} = \frac{b_{11}^1}{b^{+*}};$$

$$b^{+*} = b_{11}^1b_{22}^1 - b_{12}^1b_{21}^1.$$

Назначим требуемые значения

$$\mathbf{\Phi}_1 = \begin{pmatrix} f_{11} & 0 \\ 0 & f_{12} \end{pmatrix}; \ \mathbf{\Phi}_0 = \begin{pmatrix} f_{01} & 0 \\ 0 & f_{02} \end{pmatrix}$$

и, используя (8), получаем вид матрицы коэффициентов

$$\mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} a_{11}^1b_{11}^{1+} + a_{21}^1b_{12}^{1+} - b_{11}^{1+}f_{11} & a_{12}^1b_{11}^{1+} - b_{12}^{1+}f_{11} \\ a_{11}^1b_{21}^{1+} + a_{21}^1b_{22}^{1+} - b_{21}^{1+}f_{12} & a_{12}^1b_{21}^{1+} - b_{22}^{1+}f_{12} \end{pmatrix} \quad (25)$$

и далее согласно выражениям (20)...(25) — общий вид матрицы коэффициентов обратной связи (матрицы регулятора)

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{pmatrix}, \quad (26)$$

где

$$k_{11} = a_{11}b_{11}^m + a_{21}b_{12}^m + a_{31}b_{13}^m - b_{11}^mf_{01}; \quad (27)$$

$$k_{12} = a_{12}b_{11}^m + a_{22}b_{12}^m + a_{32}b_{13}^m - b_{12}^mf_{01}; \quad (28)$$

$$k_{13} = b_{14}^m + a_{13}b_{11}^m + a_{23}b_{12}^m + a_{33}b_{13}^m - b_{13}^m f_{01}; \quad (29)$$

$$k_{14} = a_{14}b_{11}^m + a_{24}b_{12}^m - b_{14}^m f_{01}; \quad (30)$$

$$k_{21} = a_{11}b_{21}^m + a_{21}b_{22}^m + a_{31}b_{23}^m - b_{21}^m f_{02}; \quad (31)$$

$$k_{22} = a_{12}b_{21}^m + a_{22}b_{22}^m + a_{32}b_{23}^m - b_{22}^m f_{02}; \quad (32)$$

$$k_{23} = b_{24}^m + a_{13}b_{21}^m + a_{23}b_{22}^m + a_{33}b_{23}^m - b_{23}^m f_{02}; \quad (33)$$

$$k_{24} = a_{14}b_{21}^m + a_{24}b_{22}^m - b_{24}^m f_{01}; \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
b_{11}^m &= b_{11}^+ + l_{11}(a_{11}^1 b_{11}^{1+} + a_{21}^1 b_{12}^{1+} - b_{11}^{1+} f_{11});\\
b_{12}^m &= b_{12}^+ + l_{12}(a_{11}^1 b_{11}^{1+} + a_{21}^1 b_{12}^{1+} - b_{11}^{1+} f_{11});\\
b_{13}^m &= b_{13}^+ + a_{11}^1 b_{11}^{1+} + a_{21}^1 b_{12}^{1+} - b_{11}^{1+} f_{11};\\
b_{14}^m &= a_{12}^1 b_{11}^{1+} - b_{12}^{1+} f_{11};\\
b_{21}^m &= b_{21}^+ + l_{11}(a_{11}^1 b_{21}^{1+} + a_{21}^1 b_{22}^{1+} - b_{21}^{1+} f_{12});\\
b_{22}^m &= b_{22}^+ + l_{12}(a_{11}^1 b_{21}^{1+} + a_{21}^1 b_{22}^{1+} - b_{21}^{1+} f_{12});\\
b_{23}^m &= b_{23}^+ + a_{11}^1 b_{21}^{1+} + a_{21}^1 b_{22}^{1+} - b_{21}^{1+} f_{12};\\
b_{24}^m &= a_{12}^1 b_{21}^{1+} - b_{22}^{1+} f_{12}.
\end{aligned}$$

В соответствии с (3) и (5) имеем

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_x \\ \Delta V_y \\ \Delta\omega_z \\ \Delta\upsilon \end{pmatrix}.$$

Таким образом, на основании соотношений (27)...(34) получены аналитические выражения для вычисления управлений, которые имеют относительно компактный вид и могут быть легко реализованы в масштабе реального времени.

Численное моделирование. Воспользуемся для моделирования продольного движения ОВ числовыми значениями матриц коэффициентов вида

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0{,}0598 & -0{,}0233 & 6{,}1095 & -9{,}1703 \\ -0{,}0268 & -0{,}8899 & -69{,}2091 & -0{,}7709 \\ 0{,}0265 & -0{,}0432 & -2{,}2364 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$
$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -17{,}47 & -1{,}0228 \\ -70{,}4005 & 122{,}089 \\ 28{,}9659 & 22{,}9255 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Для указанных числовых значений объект управления имеет полюса: {−3,459; −0,3495; 0,3112 ± 0,2980*i*}. Рассматриваемая числовая модель представляет собой неустойчивый процесс.

Пусть задачей синтеза является формирование алгоритмов функционирования системы управления, которая осуществит перемещение полюсов для модели из точек множества {−3,459; −0,3495; 0,3112 ± 0,2980*i*} в точки множества

$$\{-1{,}5;\ -1{,}5;\ -1{,}5;\ -1{,}5\} \quad (36)$$

с помощью аналитически синтезированного в предыдущем разделе закона управления.

Для желаемого множества полюсов (36) выражения (19) можно записать в виде

$$\mathbf{\Phi}_0 = \begin{pmatrix} -1{,}5 & 0 \\ 0 & -1{,}5 \end{pmatrix};\ \mathbf{\Phi}_1 = \begin{pmatrix} -1{,}5 & 0 \\ 0 & -1{,}5 \end{pmatrix}.$$

Тогда с использованием (4)...(13) и матриц (35) получим

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} -0{,}4959 & 0{,}0256 & 2{,}3674 & 11{,}757 \\ 0{,}6277 & -0{,}0342 & -2{,}9578 & -14{,}7565 \end{pmatrix}.$$

При этом матрица собственной динамики в замкнутом контуре "ОВ — система управления" принимает вид

$$\mathbf{A} - \mathbf{BK} =$$
$$= 10^3 \begin{pmatrix} -0{,}0081 & 0{,}0004 & 0{,}0444 & 0{,}1811 \\ -0{,}1116 & 0{,}0051 & 0{,}4586 & 2{,}6285 \\ 0 & 0 & -0{,}0030 & -0{,}0022 \\ 0 & 0 & 0{,}001 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для начальных значений вектора состояния ОВ в системе единиц СИ $(\Delta V_x\ \Delta V_y\ \Delta\omega_z\ \Delta\upsilon)^{\mathrm{T}} = (5{,}00\ 0{,}0\ 0{,}02\ 0{,}3)^{\mathrm{T}}$ на рис. 1 представлены графики переходных процессов по компонентам вектора состояния, а на рис. 2 — значения управляющих воздействий.

Заключение. Для линеаризованной модели четвёртого порядка продольного движения ОВ получены аналитические выражения законов управления стабилизацией, основанные на оригинальной декомпозиции модели объекта управления и разработанного на её основе метода модального управления МИМО-системой. Приведены результаты численного моделирования управления боковым движением ОВ с использованием аналитических законов управления. Следует отметить, что

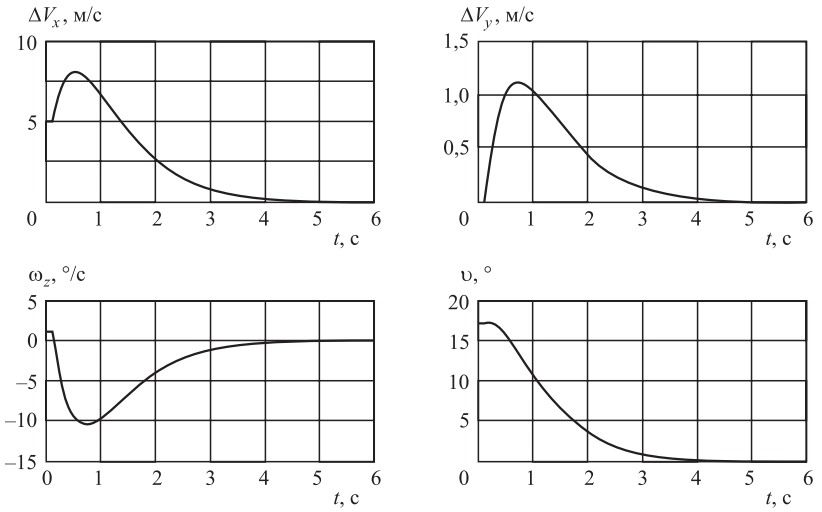


Рис. 1. Графики переходных процессов продольного канала

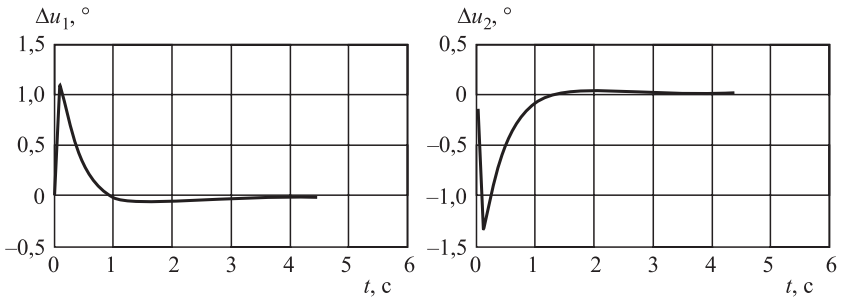


Рис. 2. Изменение управляющих воздействий продольного канала

с использованием подходов, изложенных в [7, 8], также можно получить аналитические решения, но процесс их получения более трудоёмкий, и они очень громоздки.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00046).

Библиографические ссылки

1. **Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И**. Системы автоматического управления летательных аппаратов. М., ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986. 480 с.

2. **Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Инвариантное управление маловысотным полётом одновинтового вертолёта // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 6. С. 3—8.

3. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш. и др.** Терминальное релейно-импульсное управление линейными стационарными динамическими системами // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 3. С. 134—149.

4. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 2. С. 118—132.

5. **Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N.** Pole placement for controlling a large scale power system // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72:10. P. 2123—2146.

6. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Размещение полюсов в больших динамических системах с многими входами и выходами // ДАН. 2011. Т. 439, № 4. С. 464—466.

7. **Воробьёва Е.А., Зубов Н.Е., Микрин Е.А. и др.** Синтез стабилизирующего управления космическим аппаратом на основе обобщенной формулы Аккермана // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 1. С. 96—106.

8. **Богачёв А.В., Воробьёва Е.А., Зубов Н.Е. и др.** Разгрузка кинетического момента инерционных исполнительных органов космического аппарата в канале тангажа // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 3. С. 132—139.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства
ООО «Инновационное машиностроение».

УДК 621.3.049.75

А.М. Медведев, д-р техн. наук
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)),
Г.В. Мылов, канд. техн. наук
(ОАО Государственный рязанский приборный завод)
medvedevam@bk.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОПЛОТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В АВИОНИКЕ

Определены тенденции роста плотности межсоединений в технических средствах электроники и, в частности, авионике, отличающейся особыми требованиями к характеристикам по массе и надёжности аппаратуры в экстремальных условиях эксплуатации. Показано, что физическим носителем всех межсхемных соединений являются печатные платы, по большей части — многослойные со сквозными металлизированными отверстиями, обеспечивающие максимальную плотность межсоединений. Дальнейшего увеличения плотности межсоединений можно достичь в новых конструкциях печатных плат за счёт использования технологий послойного наращивания с глухими металлизированными отверстиями. Установлено, что заполнение глухих отверстий металлом увеличивает трассировочную способность печатных плат в 2,4 раза [1] *и облегчает процедуру автоматического топологического проектирования благодаря произвольному размещению межслойных переходов по полю и объёму платы.*

Ключевые слова: авионика; печатные платы; плотность межсоединений; послойное наращивание; глухие отверстия; топологическая трассировка.

The growth tendencies of the interconnect density in electronics technical means, and, in particular, in avionics, distinguish special requirements to characteristics of apparatus weight and safety in operation extreme environments is defined. It is shown that the physical carrier for all intercircuit compounds are printed circuit boards, for the most part — multilayer with metallized holes providing maximum density interconnections. A further increase in interconnect density can be achieved in the new designs of printed circuit boards through the use of a technologies for lauerwise build-up with blind metallized holes. It was found that filling blind holes with metal increases the ability to trace of the printed circuit boards in 2.4 times [1] *and facilitates the procedure for automatic topological design owing to arbitrary placement of interlaminar transition on the field and volume of printed circuit boards.*

Keywords: avionics; printed circuit boards; interconnect density; lauerwise build-up; blind holes; topological routing.

Вся история развития авионики, как и всей электроники — стремление к уменьшению размеров, увеличению быстродействия и надёжности в экстремальных условиях эксплуатации. Этим тенденциям конструкции технических средств авионики будут следовать постоянно.

Каковы темпы роста плотности межсоединений? Гордон Мур (Gordon Moore) — один из основателей компании Intel — установил, что плотность логических элементов микросхем удваивается каждые полтора года. На основании этой закономерности в 1965 г., когда плотность составляла 50 компонентов на кристалле, он предрекал, что в 1975 г. она составит 65 тыс. компонентов на кристалле, что и произошло. Эта тенденция действует до сих пор, и стала она называться *Законом Мура*.

Вслед за этим многолетняя статистика говорит о том, что вместе с повышением плотности активных элементов на кристалле увеличивается количество выводов корпуса микросхем на 40 % в год. Казалось бы, с увеличением интеграции микросхем количество внешних межсоединений и, соответственно, выводов должно уменьшаться. Однако выведенное инженером фирмы IBM *правило Рента* до сих пор справедливо для развивающейся элементной базы:

$$n = kN^R,$$

где n — количество выводов микросхемы; k — среднее число межсоединений, приходящихся на один логический элемент микросхемы (k = 3...4); N — количество логических элементов; R — соотношение Рента (например, для процессоров R = 0,5...0,74).

Растущие конструктивно-технологические требования к печатному монтажу особенно чётко установились в области вычислительной техники и систем управления, поскольку увеличение производительности наряду с увеличением быстродействия элементной базы находится в непосредственной зависимости от возможностей сокращения длины связей

между логическими элементами, так называемой конструктивной задержки передаваемого сигнала. Достаточно сопоставить значение времени переключения логических элементов, не превышающее в современных ИС, СИС и БИС единиц наносекунд, с временем распространения сигнала в печатных линиях связи, составляющем 6...7 нс/м, чтобы показать, что главной составляющей временных задержек в электронных устройствах современного и перспективного типов являются задержки сигналов в линиях связи. Отсюда следует, что повышение быстродействия логических элементов должно сопровождаться максимально возможным снижением задержек в межсоединениях, т.е. сокращением их длины. Это достигается повышением степени интеграции логических элементов, более плотной компоновкой микросхем на платах за счёт увеличения плотности межсоединений и сокращения длин линий связи.

Оценка плотности межсоединений. Количество межсоединений определяется суммарным числом выводов всех микросхем, устанавливаемых на печатную плату:

$$N_c = tN_t,$$

где N_c — число межсоединений; t — коэффициент разветвления соединений, лежащий, в зависимости от типа ПП, в пределах 1...4; N_t — суммарное число выводов всех микросхем.

Суммарная длина соединений в печатных платах определяется количеством межсоединений и средней длиной одного соединения:

$$L_c = N_c l_c = N_t t i \frac{2}{3}\sqrt{s},$$

где L_c — суммарная длина межсоединений печатной платы; l_c — средняя длина одного соединения (статистические исследования показывают, что при произвольном размещении микросхем на плате, средняя длина одного соединения определяется размером платы $l_c \approx i\frac{2}{3}\sqrt{S}$); S — площадь печатной платы; i — коэффициент использования монтажного поля платы выводами микросхем.

Но существует также ряд эмпирических уравнений для вычисления общей длины межсоединений. Наиболее простое было получено доктором Д. Серафимом [2]:

$$L_c = 2{,}25N_t P,$$

где P — шаг установки микросхем на плате.

Отношение к площади платы S суммарного числа выводов микросхем N_t и суммарной длины соединений L_c в ней будем называть соответственно плотность монтажа $\rho_м$ и плотностью соединений ρ_c:

$$\rho_м = N_t/S; \quad (1)$$

$$\rho_c = \frac{2N_t it}{3\sqrt{S}}. \quad (2)$$

Используя (1) и (2), получаем соотношение между плотностями соединений и монтажа:

$$\rho_c = \frac{2}{3}\sqrt{S} it \rho_м.$$

Таким образом, увеличение плотности размещения монтажных элементов и линейных размеров плат требует пропорционального увеличения плотности соединений. В то же время плотность соединений определяется плотностью трассировки, т.е. количеством проводников, прокладываемых между отверстиями (рис. 1), и коэффициентом использования трасс, а в МПП — ещё и количеством сигнальных слоёв m_c:

$$\rho_c = (n_t + 1)qm_c/T,$$

где n_t — число трасс проводников между отверстиями; T — шаг сквозных отверстий, между которыми трассируются проводники; q — коэффициент использования трассировочного пространства.

Коэффициент использования трассировочного пространства принимает значения в пределах $0 < q < 1$ в зависимости от степени взаимной независимости направлений трассировки соединений. Значения q приближаются к единице с увеличением числа пере-

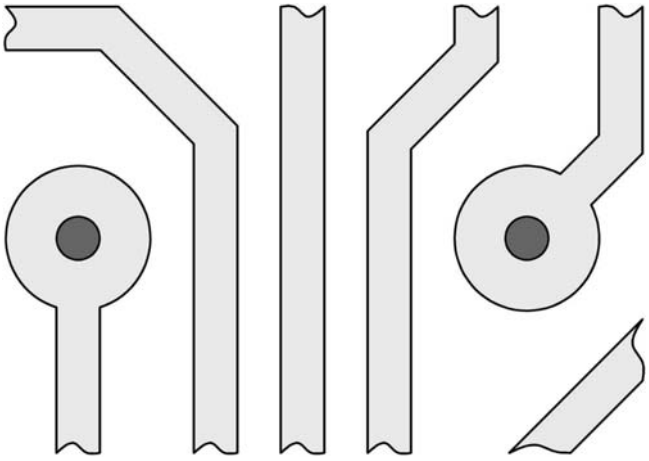


Рис. 1. Трассировочное пространство ПП

ходных отверстий, создающих возможность обхода пересечений трасс.

Существует, по крайней мере, четыре пути повышения плотности межсоединений и монтажа компонентов на печатных платах:

уменьшение размера отверстий и контактных площадок для расширения трассировочного пространства;

увеличение количества трасс между отверстиями за счёт уменьшения ширины проводников и зазоров (уменьшения шага трасс проводников);

введение многоуровневых межсоединений: отказ от сквозных отверстий в пользу глухих и слепых межслойных переходов;

увеличение количества слоёв.

Влияние контактных площадок на площадь трассировки. Основным препятствием на пути увеличения плотности межсоединений являются контактные площадки большого диаметра, так как они уменьшают трассировочное пространство между отверстиями, как бы являясь мишенью для сверления отверстий. Чем больше погрешности пространственного совмещения элементов межсоединений, тем вынужденно больше должен быть размер контактных площадок, чтобы обеспечить гарантированное в них попадание. Поэтому назначение контактных площадок вокруг просверленных отверстий состоит в том, чтобы компенсировать любые возможные смещения элементов межсоединений в слоях относительно друг друга, а также не допустить попадания отверстия за пределы контактной площадки. Такие несовпадения в основном вызваны размерной нестабильностью базового материала и смещением основания на различных этапах производства печатных плат.

Поэтому считается, что надёжное соединение обеспечивается лишь при наличии гарантированного пояска охвата отверстия контактной площадкой. Его минимальные размеры обычно принимаются равными толщине фольги. Минимальный размер контактных площадок рассчитывают из условий обеспечения минимальной ширины гарантированного пояска охвата с учётом всех неизбежных погрешностей производства. Грубый расчёт размера контактных площадок производят по формуле с использованием обозначений, показанных на рис. 2:

$$J_{\min} = M + 2G + T,$$

где $J_{\min}$ — минимальный размер контактной площадки; M — диаметр сверления; G — минимальная ширина пояска охвата металлизированного отверстия контактной площадкой; T — погрешности технологического характера.

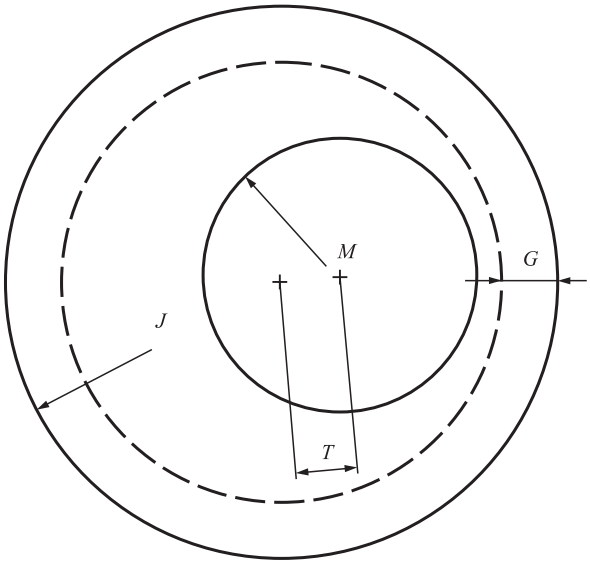


Рис. 2. Схема контактной площадки с переходным отверстием

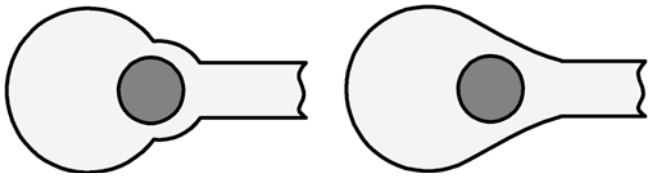


Рис. 3. Контактные площадки с удлинениями в сторону проводника

Несколько уменьшить размер контактной площадки и, соответственно, увеличить трассировочное пространство можно, удлинив её формы в сторону подхода проводника к контактной площадке (рис. 3).

В этом случае практически не изменяется трассировочная способность, но при этом существенно расширяется допуск на смещение переходного отверстия.

Двукратное уменьшение диаметра контактной площадки даёт трёхкратный выигрыш в плотности разводки, что на практике позволяет избавиться от половины сигнальных слоёв, и вследствие этого — от половины слоёв земли и питания ПП. При этом существует прямая зависимость между минимальным диаметром площадки и относительной размерной стабильностью базового материала: использование стеклотекстолита с относительным смещением 0,02 % вместо 0,05 % позволяет уменьшить проектные нормы для расчёта контактной площадки с 0,25 до 0,1 мм (рис. 4).

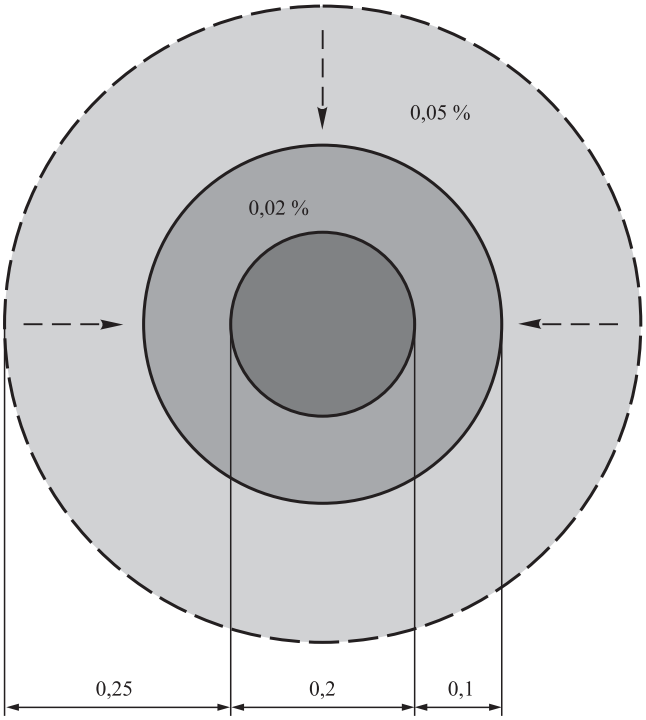


Рис. 4. Выигрыш в размере контактной площадки при использовании более стабильного базового материала

Уменьшение ширины проводников и зазоров. Очевидно, что уменьшение ширины проводников и зазоров позволяет увеличить количество трасс на каждом слое платы. Но уменьшать ширину проводников бесконечно невозможно. Такое уменьшение ограничено токонесущими свойствами и омическим сопротивлением проводников. Омическое сопротивление в ещё большей мере сказывается на работоспособности схем, когда они имеют большую длину трасс, что для плат не редкость. Существуют и технологические ограничения на ширину проводников, связанные непосредственно с производственным процессом. Выход готовой продукции резко падает, если требования к производственным процессам не укладываются в рамки допусков, определяемых применяемым оборудованием, материалами и параметрами климатической зоны производственных помещений. Имеются ограничения и на уменьшение расстояний между проводниками (изоляционные зазоры).

Тем не менее, если удалось достичь уменьшения ширины проводников с учётом описанных ограничений, то это позволит эффективно влиять на плотность межсоединений и снижение себестоимости производства печатных плат.

Увеличение количества проводящих слоёв. Это самое простое решение: когда не хватает места на существующих слоях для размещения всех необходимых межсоединений, добавляют ещё один слой. Этот подход широко применялся ранее, но когда эффективность затрат на изготовление подложек стала иметь огромное значение, возникла необходимость сведения до минимума количества дополнительных слоёв вследствие существенно растущих затрат на изготовление платы. Тем более что любое увеличение слоёв сигнальной разводки в платах, работающих на высоких (> 1 ГГц) частотах, удвоит общее количество слоёв из-за необходимости использования экранных слоёв (заземления или питания) между слоями сигнальной разводки.

Использование многоуровневых соединений. Проектировщики и производители для увеличения трассировочного пространства и мобильности трёхмерной разводки проводников идут на значительные усложнения технологий, чтобы выполнять в многослойных структурах глухие и скрытые отверстия (рис. 5).

Монтаж микросхем с матричными выводами с шагом менее 1,0 мм крайне затруднён на печатных платах, традиционно изготавливаемых методом металлизации сквозных отверстий. Уже созданы корпуса микросхем типа CSP с меньшим шагом матричных выводов 0,508 мм (0,020 дюйма) и 0,254 мм (0,010 дюйма), монтаж которых ещё более

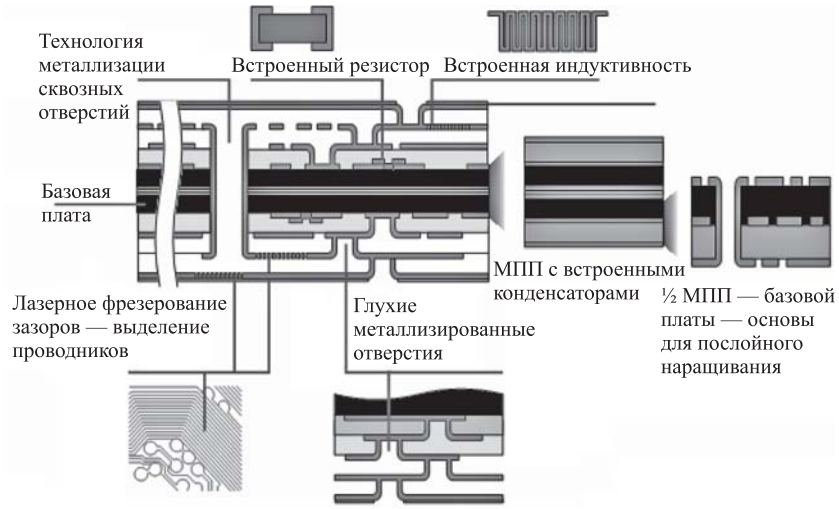


Рис. 5. МПП с послойным наращиванием межслойных переходов, лазерным формированием прецизионного рисунка, с встроенными пассивными элементами схем

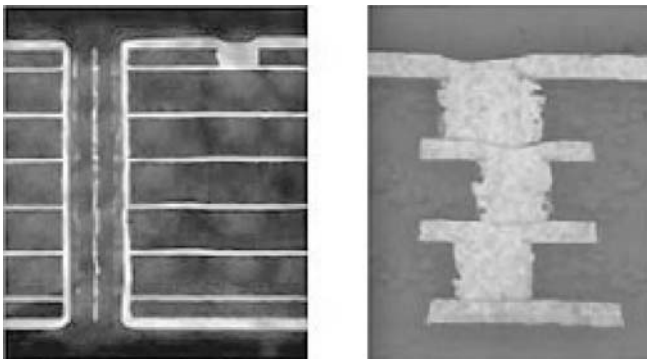


Рис. 6. Межслойные переходы с глухими отверстиями

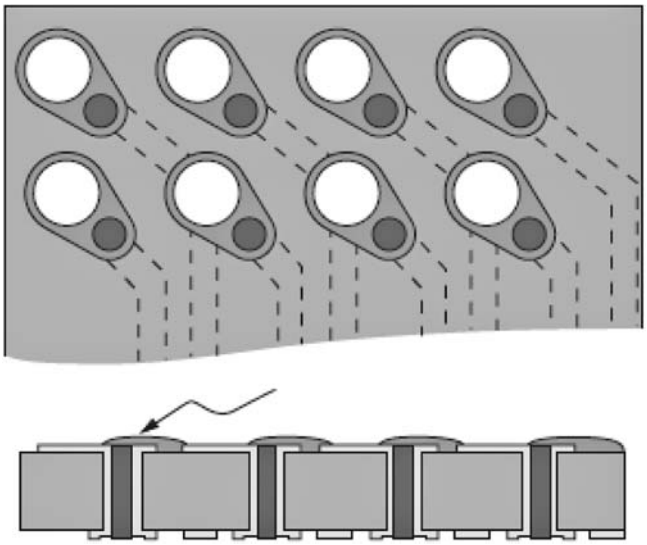


Рис. 7. Один из способов предотвращения перетока расплавленного припоя в отверстие — разнесение монтажной площадки и металлизированного отверстия:
белый круг — монтажная площадка для пайки, открытая от паяльной маски; тёмно-серый круг — металлизированное отверстие, закрытое паяльной маской, что предотвращает переток припоя с монтажной площадки в отверстие

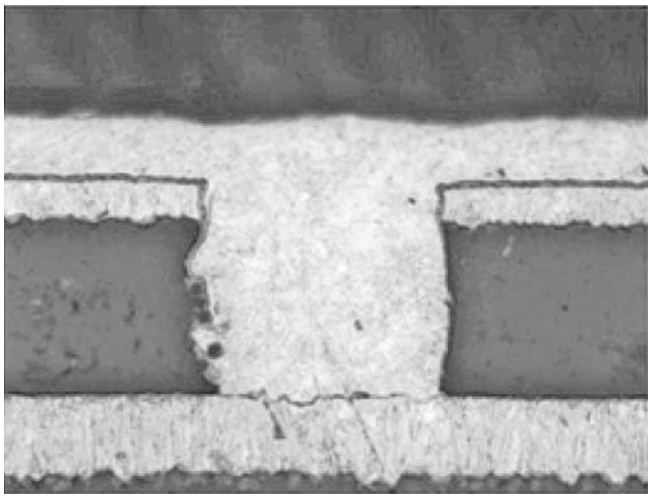


Рис. 8. Глухое отверстие, заполненное медью, совмещает в себе переход на внутренний слой и монтажную контактную площадку

затруднён. Проблема решается добавлением к МПП специальных слоёв с глухими металлизированными отверстиями, на которых реализуется разводка цепей из-под микрокорпусов или из-под бескорпусных кристаллов микросхем (рис. 6).

Эти тонкие дополнительные специализированные слои напрессовываются на МПП, после чего в них выполняются глухие металлизированные отверстия. В этой технологии используется сочетание методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания. В русской среде она называется "МПП с послойным наращиванием внешних слоёв" или "МПП с глухими отверстиями" — пока не будет принято более лаконичное её наименование.

Размеры элементов межсоединений в послойном наращивании доведены до предельно возможных: отверстий — до 0,1 мм, контактных площадок — до диаметра 0,3 мм. Для формирования таких отверстий используют лазер, а для рисунка проводников — прямую экспозицию фоторезиста с матричным формированием изображений.

Наибольший эффект получают при использовании глухих заполненных отверстий для формирования монтажного поля под матричную систему шариковых выводов в корпусах компонентов типа BGA. При отсутствии возможности изготовления плат с глухими заполненными отверстиями необходимо конструировать монтажное поле так, чтобы предотвратить утечку припоя в сквозные отверстия, как показано на рис. 7.

Если для перехода на внутренний слой используется глухое отверстие, заполненное медью (рис. 8), функции перехода и монтажной площадки совмещаются.

Проведённые расчёты [1] показывают, что при использовании традиционных технологий плотность монтажного поля составляет 170 элементов на квадратный сантиметр, в то время как новая технология, построенная на принципах послойного наращивания с глухими отверстиями, заполненными металлом, позволяет разместить на одном квадратном сантиметре 400 монтажных элементов, т.е. в 2,3 раза больше.

Заключение. Основным препятствием на пути увеличения плотности трассировки являются контактные площадки большого диаметра вокруг металлизированных отверстий. Они снижают возможности трассировки печатных плат. Это обусловливает использова-

ние всех приёмов для уменьшения их размеров. Хороший прирост плотности межсоединений даёт уменьшение шага трасс проводников, но связанное с этим уменьшение ширины проводников имеет ограничение вследствие повышения их омического сопротивления, что сказывается на согласовании линий связи. Увеличение количества слоёв — наиболее простой, но самый дорогой способ увеличения трассировочного пространства платы. Использование многоуровневых переходов в конструкциях послойного наращивания с глухими отверстиями позволяет получить отличные результаты, но требует значительных инвестиций в производство. В настоящее время уменьшение размера контактных площадок — наиболее эффективный способ увеличения плотности межсоединений в многослойных печатных платах.

Библиографические ссылки

1. **Миронова Ж.А., Шахнов В.А., Гриднев В.Н.** Высокоплотная компоновка проводящего рисунка многослойных коммутационных плат // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2014. № 6 (99). С. 61—70.

2. **Медведев А.М.** Электронные компоненты и монтажные подложки. Постоянная интеграция // Компоненты и технологии. 2006. № 12. С. 28—32.

УДК 519.711

И.М. Александров, Л.Г. Евсевлеева, канд. хим. наук, доц., **А.В. Баденников,** канд. техн. наук, доц.
(Ангарский государственный технический университет)

ai@angtu.ru

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Описана методика построения интеллектуальных систем управления процессом горения жидких топлив в промышленных печах. Предлагаемая методика позволяет создавать системы управления для процессов с высокой степенью неопределённости, которая затрудняет применение точных количественных методов. В ходе исследований получена аналитическая модель горения жидких топлив, позволяющая понять и оценить зависимость переменных процесса горения.

Ключевые слова: математическое моделирование; интеллектуальная система управления; нечёткая система; нейронная сеть; нечёткие правила; экспертные оценки; процесс горения; жидкое топливо; промышленная печь; наиболее влияющие переменные; концентрация кислорода; виртуальный датчик.

The building methodology of the intelligent control systems for liquid fuels combustion in industrial furnaces is described. The proposed methodology allows to create a control system for processes with a high degree of uncertainty, which hinders the use of precise quantitative techniques. In the course of research an analytical model of the liquid fuels combustion that allows to understand and evaluate the dependence of the combustion process variable.

Keywords: mathematical modeling; intelligent control system; fuzzy system; neural network; fuzzy rules; expert valuatios; combustion process; liquid fuel; industrial furnace; the most influencing variables; the oxygen concentration; virtual sensor.

Управление технологическими процессами сжигания топлив проходит в условиях информационной неопределённости, связанной со сложностью и неизученностью протекания процессов горения. Для управления указанными процессами предлагается использовать методы интеллектуального управления, доказавшие на практике свою высокую эффективность при наличии неполной или неопределённой информации о рассматриваемых процессах.

В области управления нечёткое моделирование позволяет [1—4]:

получить более адекватные результаты по сравнению с аналитическими моделями алгоритмов управления;

достичь уменьшения объёмов вычисления.

Типовая схема организации процесса горения химических топлив включает в себя устройство для сжигания мазута — собственно горелки и огнеупорный горелочный туннель, через который смесь воздуха и топлива поступает в печь. В топочную камеру печи при помощи форсунки вводится распылённое топливо, а также необходимый для горения нагретый воздух. Высокая степень дисперсности топлива обеспечивает его интенсивное перемешивание с воздухом и, как следствие, более эффективное горение. На рис. 1 показана схема печи [5].

Определяющими факторами, влияющими на протекание процесса горения жидкого топлива в топочных печах являются: температура, состав и скорость подачи топлива и газа; доли газа, прошедшие через плотную и разрежённую фазы; скорость обмена газа между фазами; скорость химических реакций и их диффузионное торможение; скорость выгорания органической составляющей топлива [6].

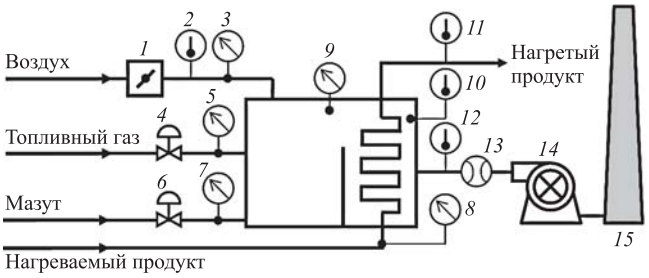


Рис. 1. Схема реализации сжигания топлива:
1 — регулятор подачи воздуха, подаваемого в печь; *2* — датчик температуры подаваемого в печь воздуха; *3* — датчик давления подаваемого в печь воздуха; *4* — регулятор подачи топливного газа; *5* — датчики давления потока топливного газа (*P*2); *6* — регулятор подачи мазута; *7—13* — датчики давления мазута (*P*3), давления потока продукта на входе печи, давления разряжения в печи (*P*1), температуры внутри печи (*T*2), температуры нагреваемого продукта на выходе печи (*T*1), температуры дымовых газов, концентрации кислорода в дымовых газах (*Q*) соответственно; *14* — дымосос; *15* —дымоотвод

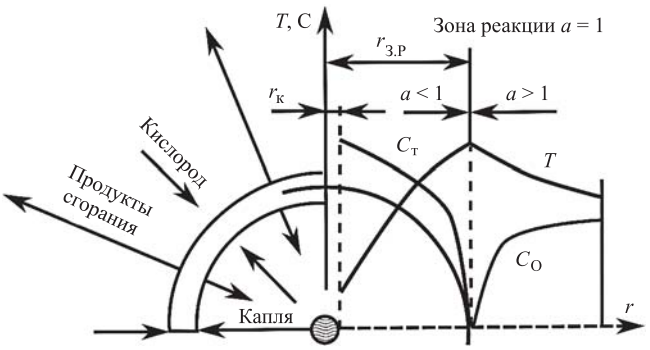


Рис. 2. Механизм горения капли жидкого топлива:
$r_к$ — радиус капли; $r_{з.р}$ — радиус зоны реакции; $C_т$ — объёмная концентрация топлива (пары); $C_о$ — объёмная концентрация окислителя (кислород) [6]

Под эффективностью сгорания топлива понимают отношение количества выделившегося тепла к количеству тепла, образовавшегося при полном сгорании топлива [7]:

$$\eta = \frac{G_S - G_S^1}{G_S}, \qquad (1)$$

где G_S — массовая скорость подачи топлива в зону реакции; G_S^1 — потери, связанные с выгрузкой и загрузкой.

В свою очередь,

$$G_S^1 = G_S - \frac{M_C}{P_C} S \alpha_C W, \qquad (2)$$

где M_C — молекулярная масса углеводородов; P_C — массовая доля углеводородов; S — поверхность непрореагировавших частиц; α_C — избыток воздуха для жидких топлив; α_C = 1—1,2 [7]; W — скорость реакции:

$$W = K(T)C, \qquad (3)$$

где C — объёмная концентрация кислорода, вычисляемая с учётом диффузионного торможения в реакционной зоне (рис. 2) с использованием уравнения Лапласа для случая стационарного состояния [8]:

$$\frac{D}{\rho^2}\frac{d}{d\rho}\left(\rho^2 \frac{dC}{d\rho}\right) = 0, \quad r < \rho < r_0, \qquad (4)$$

с граничными условиями

$$D\left.\frac{dC}{d\rho}\right|_{\rho=r} = \alpha K_1 C(\rho), C(r_0) = C^{\alpha}, \qquad (5)$$

где D — коэффициент диффузии; r_0 — радиус капли топлива; $K_1 = k_0 \exp(-E/RT)$ — константа скорости реакции; k_0 — предэкспонента.

Решая (4) и (5), получим формулу для вычисления концентрации кислорода в зоне реакции (т.е. при $\rho = r$):

$$C = C^{\alpha}\left(1 + \frac{\alpha r_0}{\rho} K_1\right)^{-1}. \qquad (6)$$

В формуле (6) C^{α} находят из материального баланса кислорода, учитывающего наличие двух фаз реакционной зоны: плотной и диффузионной. Для диффузионной зоны уравнение имеет вид:

$$U^p \frac{dC^p}{dl} = -\beta f(C^d - C^p), C^d(0) = C^f, \qquad (7)$$

где C^f — входная концентрация кислорода; f — доля объёма, занимаемая плотной фазой.

Уравнение для плотной части:

$$S_R U^p (C^f - C^p) + \\ + S_R \beta f \int_0^L (C^d - C^p) dl - S\alpha W = 0, \quad (8)$$

где S_R — сечение аппарата; β — коэффициент интенсивности газообмена; W — определяется скоростью подачи газа; U^p — скорость движения газа в плотной части реакционной и диффузионной зон.

В свою очередь, $U^p = U_f - U^d$, где U^d — скорость движения газа в диффузионной части реакционной зоны; $U_f = G_g/\rho_g S_R$, где G_g — массовая скорость подачи воздуха; ρ_g — плотность воздуха.

Интегрируя (8), получим концентрацию кислорода в плотной фазе:

$$C^d = C^f \left(1 + \frac{S\alpha K(T)}{S_R \left[U^p + U^d (1 - \exp(-K_2)) \right]} \right), \quad (9)$$

$$K_2 = \frac{\beta f L}{U^p}.$$

Для определения S воспользуемся плотностью распределения $\rho_1(r)$ числа частиц по радиусу капель, предполагая, что частицы пара монодисперсны:

$$\rho_1(r) = \begin{cases} \dfrac{K_3}{r_0} \exp(K_3 \dfrac{r - r_0}{r_0}), r \leqslant r_0 \\ 0, r > r_0, \end{cases} \quad (10)$$

где $K_3 = \dfrac{F_0 r_0}{N_S K_4}$ — безразмерный параметр;

$F_0 = G_S / \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_S$ — скорость подачи топлива;

G_S — массовая скорость загрузки топлива;

$N_S = V_S / \frac{4}{3} \pi r^3$ — число капель в реакционной зоне; V_S — суммарный объём топлива;

$K_4 = \dfrac{M_C}{P_c \rho_S} L W$ — безразмерный коэффициент.

Тогда, исходя из формулы (10), поверхность всех непрореагировавших частиц определяется как

$$S = N_S \int_0^{r_0} 4\pi r^2 \rho_1(r) dr = \\ = \frac{3V_S}{r_0} \left(1 - \frac{2}{K_3} + \frac{2}{K_3^2} \left(1 - e^{-K_3} \right) \right). \quad (11)$$

Вычислим концентрацию кислорода на выходе из зоны реакции:

$$C^\alpha = \frac{U^d}{U^f} C^d + \frac{U^p}{U^f} C^p. \quad (12)$$

Для контроля процесса используют датчики температуры, давления и концентрации кислорода. По концентрации кислорода в дымовых газах делают вывод о полноте и качестве протекания технологического процесса. Высокая сложность разработки автоматизированной системы управления (АСУ) данным технологическим процессом связана с невозможностью получения полного определения и описания технологических режимов. Для поддержания заданного эксплуатационного режима АСУ должна иметь в своём составе сравнительно сложный механизм принятия решения, что достигается только с использованием стратегического подхода к определению локальных неопределённостей в задачах управления, которые всегда квалифицируются в качестве основного критерия степени "интеллектуальности" технических средств автоматизации.

Как известно, искусственные нейронные сети (ИНС) являются наиболее эффективным методом решения там, где традиционные вычисления трудоёмки или физически неадекватны. ИНС весьма эффективны для задач распознавания, но не удобны для внесения правил, по которым происходит это распознавание. Они могут автоматически приобретать знания, но процесс их обучения зачастую достаточно долог. Анализ обучений сети сложен, как правило, обученная сеть для пользователя представляется "чёрным ящиком". При этом какую-либо априорную информацию для ускорения обучения в нейронную сеть внести невозможно.

Системы нечёткой логики, напротив, подходят для объяснения полученных результатов, но они не могут автоматически приобретать знания для использования их в механизме правил вывода. Математическая теория нечётких множеств позволяет описывать понятия и знания, оперировать этими значениями и делать выводы.

Нечёткое управление особенно полезно, когда технологические процессы оказываются слишком сложными для анализа при помощи общепринятых количественных методов, или когда доступные источники информации интерпретируются некачественно, неточно или неопределённо, т. е. исходные данные являются ненадёжными и слабо формализованными.

Теоретически системы нечёткого вывода и нейронные сети эквивалентны друг другу. В таких системах выводы делают на основе аппарата нечёткой логики — соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения

нейронных сетей. Такие системы не только используют априорную информацию, но и могут приобретать новые для пользователя знания.

Продукционные нечёткие нейронные сети (ННС) представляются тремя слоями: введение нечёткости (фаззифицирующий), нечёткий вывод и приведение к чёткости (дефаззифицирующий).

ННС для управления технологическими процессами горения жидких топлив спроектированы на базе структуры Ванга—Менделя [2, 4]. Был разработан программный комплекс для подготовки исходных данных, настройки и процесса обучения, контроля процесса обучения, анализа полученных с помощью обученной ННС данных и внедрения в структуру корректирующего, дополняющего мнения эксперта.

Создание структуры, настройка параметров и проверка качества функционирования ННС осуществляются по выборкам: обучающей, проверочной и контрольной, которые представлены в виде файлов, где первые столбцы соответствуют входным переменным, а последний — единственной выходной переменной.

Пример сформированной обучающей выборки представлен в таблице. Реальная обучающая выборка может содержать более 100 исходов.

Все показания в выборке нормируются по формуле (13)

$$x_{\text{н}} = \frac{x - x_{\text{ср}}}{x_{\max}}, \qquad (13)$$

где x — показание переменной; $x_{\text{н}}$ — нормированное показание переменной; $x_{\text{ср}}$ — среднее нормальное значение, полученное из технологического регламента; $x_{\max}$ — максимальное значение, показываемое датчиком.

Обучающая и проверочная выборки непосредственно задействуются в процессе настройки параметров ННС, проверочная — для выяснения ситуаций переобучения сети, при котором ошибка для обучающей последовательности стремится к нулю, а для проверочной — возрастает. Наличие проверочной выборки не является строго необходимым. Контрольная выборка применяется для проверки качества функционирования настроенной (обученной) сети.

Модуль вывода результатов обучения позволяет провести проверку и тестирование

Показания датчика						Результат ННС
$P1$	$P2$	$P3$	$T1$	$T2$	Q	
4,39702	0,44969	4,733	285,0154	583,9979	11,31674	11,30
4,07046	0,45039	4,71734	284,9862	582,1702	11,35363	11,36
4,35888	0,45542	4,70588	284,9652	598,9568	11,0821	11,1

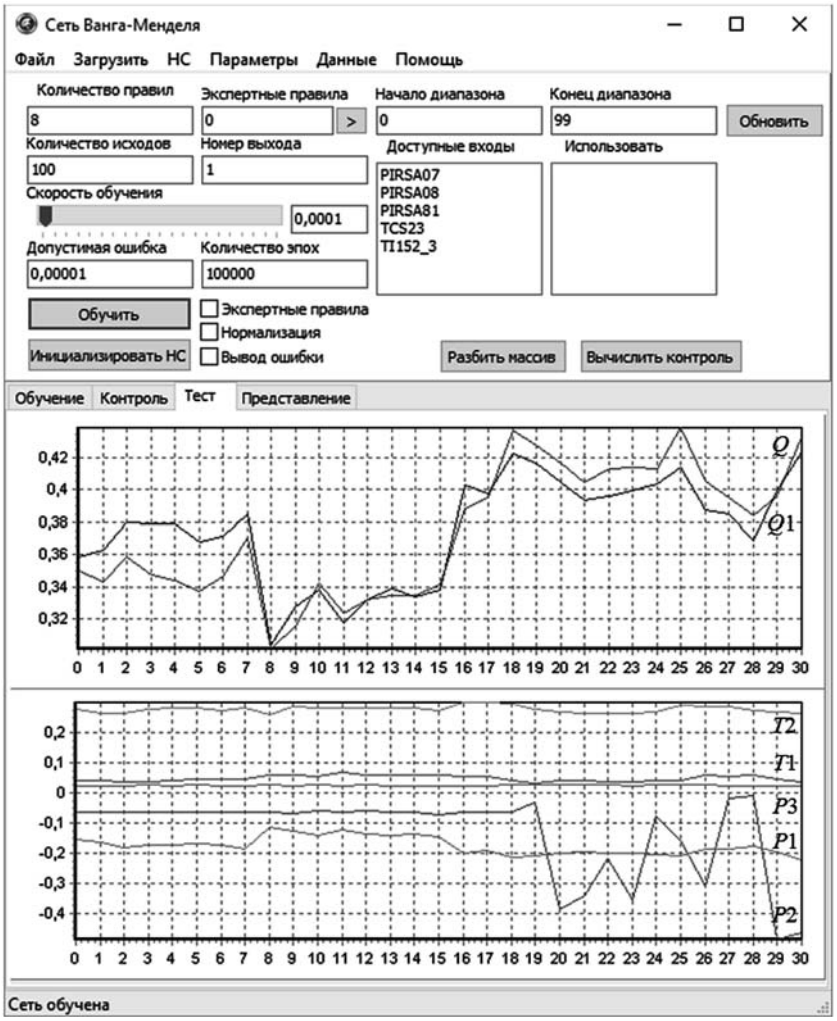


Рис. 3. Интерфейс программы обучения виртуального датчика:
Q — концентрация кислорода в дымовых газах; $Q1$ — параметр Q, вычисленный ННС; $P1$—$P3$ — давление разряжения в печи, потока топливного газа, давление жидкого топлива соответственно; $T1$—$T2$ — температура нагреваемого продукта на выходе печи и внутри печи соответственно

созданной и обученной ННС с выводом результатов в виде графиков и списка продукционных правил (рис. 3).

Графический интерфейс программного комплекса ННС содержит следующие окна: редактор-анализатор исходных данных, редактор структуры сети, редактор параметров обучения, редактор мнения эксперта, отображение процесса и результатов обучения.

Редактор структуры сети содержит опции, позволяющие выбирать методы вычислений, изменять структуру базовой сети и обеспечивает доступ к остальным функциям программного комплекса.

Кроме функций принадлежности, для ННС требуется формулирование и ввод в неё правил (типа "если условие, то значение"), называемых импликациями. Правила определяют взаимосвязь между входами и выходами системы, заставляя её генерировать чёткий вывод, учитывая нечёткие суждения.

Правила формулируют эксперты (технологи), затем их обобщают и вводят в систему при помощи редактора мнения эксперта. Ниже приведены некоторые правила, сформулированные для рассматриваемой АСУ:

[((*P*1 = "выше среднего") ∩ (*P*2 = "среднее") ∩ ∩ (*P*3 = "выше среднего") ∩ (*T*1 = "ниже среднего") ∩ (*T*2 = "ниже среднего")) → (*Q* = "средний")] → (необходимо снизить *P*1 до "среднего");

[((*P*1 = "выше среднего") ∩ (*P*2 = "ниже среднего") ∩ (*P*3 = "ниже среднего") ∩ ∩ (*T*1 = "средний") ∩ (*T*2 = "ниже среднего")) → → (*Q* = "выше среднего")] → (необходимо снизить *P*1 до "ниже среднего");

[((*P*1 = "ниже среднего") ∩ (*P*2 = "выше среднего") ∩ (*P*3 = "выше среднего") ∩ (*T*1 = = "выше среднего") ∩ (*T*2 = "ниже среднего")) → → (*Q* = "высокий")] → (необходимо снизить *P*2 до "среднего");

[((*P*1 = "низкий") ∩ (*P*2 = "низкий") ∩ ∩ (*P*3 = "средний") ∩ (*T*1 = "низкий") ∩ (*T*2 = = "ниже среднего")) → (*Q* = "низкий")] → (необходимо повысить *P*1 ∩ *P*2 до "среднего").

ННС как система управления технологическим процессом горения жидких топлив, способна формировать управляющие сигналы для исполнительных механизмов. Корректность её работы зависит от адекватности формирования функций принадлежности и правил работы системы.

В статье рассмотрена одна переменная, где всем правилам приписывается один и тот же вес. Другим ограничением архитектуры системы является качество входных переменных, они должны быть наиболее влияющими [2]. Данная интеллектуальная система спроектирована для функционирования в условиях повышенной неопределённости. Её механизм принятия решения строится на базе методов адаптивного управления и может дополнительно использовать эвристические методы для коррекции алгоритмов управления в ходе эксплуатации новых функций или цели управления.

Библиографические ссылки

1. **Александров И.М., Благодарный Н.С.** Использование экспертных знаний для построения виртуальных датчиков: Винеровские чтения / Тр. IV Всероссийской конф. Ч. II. 2011. С. 5—14.

2. **Александров И.М., Благодарный Н.С.** Программная реализация виртуального датчика для оценки концентрации кислорода в дымовых газах: Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-26: сб. тр. XXVI Междунар. науч. конф.: в 2-х ч. Ч. 1. [под общ.ред. А.А. Большакова]. Ангарск: Ангарск. гос. техн. акад.; Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2013. С. 121—124.

3. **Александров И.М., Благодарный Н.С.** Программная реализация нечёткой нейронной сети для оценки концентрации этилена верха колонны К-11 установки ЭП-300 // Вестник АГТА. 2012. № 6. С. 34—37.

4. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ., 2-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

5. **Технологический** регламент. Селективная очистка масел фенолом на установке А-37/3 и резервуарный парк 44, 44а цеха 101 Завода масел ОАО "АНХК", ОАО "АНХК", 2011. 42 с.

6. **Ляшков В.И.** Теоретические основы теплотехники, 2-е изд., М.: Машиностроение, 2005. 260 с.

7. **Лебедев Б.В., Карякин С.К.** Технология сжигания органических топлив: учеб. пособ. Томск: изд-во Томского политех. ун-та, 2012. 148 с.

8. **Демиденко Н.Д.** Моделирование статистических и динамических режимов в трубчатых печах / Вестник ТГУ. 2012. № 3. С. 13—21.

УДК 621.9.08:53.088

С.Г. Гумаров, канд. техн. наук, **О.К. Золотов, Е.М. Волотов,** канд. техн. наук,
И.В. Митрофанов, канд. техн. наук
(Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны им. В.П. Чкалова)

volotovevgenii@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ, МИНИМИЗИРУЮЩЕЙ ОШИБКИ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА

Рассмотрена проблема определения погрешности измерения параметров образцов авиационной техники в зависимости от заданных вероятностей ложного и необнаруженного отказов, проведён анализ состояния её решения и уточнён порядок выбора средства измерения или измерительного контроля в зависимости от рассчитанного среднего квадратичного отклонения погрешности измерения параметра для получения достоверного результата измерений.

Ключевые слова: вероятность; достоверность; ложный отказ; необнаруженный отказ; среднее квадратичное отклонение; погрешность; результат измерения; закон распределения.

The error measurement determining problem of the aircraft technik samples parameters, depending on a given probability of false and undetected failures is considered. State analysis of this problem solution is carried out. The choise order of the measurement meanse instruments or measuring control, depending on the calculated mean square error of measured parameter deviations to obtain reliable measurement results is specified.

Keywords: probability; reliability; false failure; undetected failure; mean square deviation; error; measurement result; distribution law.

Достижение высоких параметров качества авиационной техники (АТ) во многом зависит от метрологического обеспечения разрабатываемых и испытываемых её образцов. Качество и достоверность контроля работоспособности образцов АТ зависят от полноты и точности получаемых сведений о контролируемых параметрах, которые, в свою очередь, зависят от погрешности измерений. Погрешность измерений представляет собой совокупность методической и инструментальной составляющих.

При расчёте инструментальной составляющей погрешности измерений используют метрологические характеристики средства измерения (СИ), характеристики величин, определяющих условия проведения измерений и влияющих на погрешность измерений. Таким образом, правильный выбор СИ является обязательным условием для решения измерительных задач.

Рациональный выбор СИ с использованием эвристических методов затруднителен из-за большого числа критериев, соответствие которым необходимо учитывать. Прежде всего это требуемые диапазон измерений и точность СИ, периодичность его поверки, стоимость и т.д. Использование СИ с более высокой, чем необходимо точностью, приводит к экономически необоснованному удорожанию измерительного процесса, а использование СИ с меньшей точностью снижает достоверность измерений.

В [1, 2] рассматриваются два основных подхода к выбору СИ в зависимости от поставленных измерительных задач: измерения или контроля. В процессе решения задачи измерения определяется фактическое значение параметра, а в процессе решения задачи контроля — состояние объекта контроля: годен—не годен.

При испытаниях АТ и другого оборудования решается задача определения их технических характеристик, включающая процедуры измерения значений отдельных параметров. При решении данной измерительной задачи СИ выбирается исходя из условия, что предел фактической суммарной погрешности измерения параметров $\Delta_{пр.ф}$ не превышает требуемого $\Delta_{пр.тр}$:

$$\Delta_{пр.ф} \leqslant \Delta_{пр.тр}.$$

В общем случае при расчёте суммарной погрешности измерений параметра необходимо учитывать методическую и инструментальную составляющие погрешности измере-

ний. В случае когда суммарная погрешность измерений определяется инструментальной погрешностью, предварительный предел суммарной погрешности измерений находится с помощью выражения

$$\Delta_{\text{пр}} = \sqrt{\Delta_{\text{о}}^2 + \sum_{j=1}^{J} \Delta_j^2},$$

где $\Delta_{\text{о}}$ — предел допустимой абсолютной основной погрешности СИ; Δ_j — пределы допустимых абсолютных дополнительных погрешностей в заданных рабочих условиях эксплуатации; J — число j-х дополнительных погрешностей.

По известному верхнему пределу динамического диапазона измеряемого параметра $X_{\text{в}}$ с учётом допустимого значения предела суммарной погрешности измерений $\Delta_{\text{пр}}$ определяется конечное значение диапазона измерений [3]:

$$X_{\text{к}} \geqslant X_{\text{в}} + \Delta_{\text{пр}}.$$

Проводится оценка ориентировочного значения требуемого класса точности СИ:

$$\gamma \leqslant \frac{\Delta_{\text{пр}}}{X_{\text{к}}} \cdot 100\ \%. \qquad (1)$$

Рассчитанное значение класса точности γ СИ доводят до ближайшего соответствующего значения класса точности, определённого в [4].

По полученным значениям $X_{\text{к}}$ и класса точности γ на основании анализа методов измерения и условий эксплуатации выбирается СИ.

Существует и несколько иной подход к выбору СИ. Первоначально определяется коэффициент допускаемой погрешности:

$$R = \pm \frac{\Delta_{\text{пр}}}{S_{\text{п.д}}},$$

где $S_{\text{п.д}}$ — половина ширины установленного поля допуска на контролируемый параметр.

Если коэффициент допускаемой погрешности R не определён или не задан, то его выбирают из ряда 1,0; 0,9; 0,8 и.т.д. По заданным или установленным значениям R и $S_{\text{п.д}}$ находят предел суммарной погрешности измерений $\Delta_{\text{пр}}$ по формуле

$$\Delta_{\text{пр}} = RS_{\text{п.д}}.$$

Если известно номинальное значение измеряемого параметра $X_{\text{ном}}$, определяется конечное значение $X_{\text{к}}$ диапазона измерений:

$$X_{\text{к}} \geqslant X_{\text{ном}} + S_{\text{п.д}} + \Delta_{\text{пр}}. \qquad (2)$$

После нахождения предварительного значения $X_{\text{к}}$ ориентировочно определяется класс точности СИ по приведённой составляющей погрешности:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{\text{пр}}}{X_{\text{к}}} \cdot 100\ \%.$$

По значениям γ, $X_{\text{к}}$ и на основании анализа существующих методов измерения, характера измеряемого параметра, условий применения также предварительно выбирается СИ. Для этого СИ и соответствующей методики измерения определяется фактическое значение предела суммарной погрешности измерений $\Delta_{\text{пр.ф}}$ и сравнивается с требуемым $\Delta_{\text{пр.тр}}$.

При эксплуатации АТ основной измерительной задачей является определение технического состояния образца, т.е. осуществляется контроль определённых нормативными документами параметров, по полученным значениям которых определяется техническое состояние образца. Следует учитывать, что решение о техническом состоянии принимается в условиях неопределённости, вызванной погрешностями СИ, используемых для контроля параметров образца, и сопровождается определёнными ошибками. Таким образом, контроль технического состояния проводится с определённой достоверностью, характеризующей степень доверия к результатам контроля. При решении данной задачи СИ необходимо выбирать исходя из условия, что вероятности ложного $P_{\text{ло}}$ (условные вероятности α_i) и (или) необнаруженного $P_{\text{но}}$ (условные вероятности β_i) отказов контролируемых параметров не должны превышать их допустимых значений $P_{\text{ло}}^{\text{д}}$, $P_{\text{но}}^{\text{д}}$, $\left(\alpha_i^{\text{д}}, \beta_i^{\text{д}}\right)$:

$$P_{\text{ло}} \leqslant P_{\text{ло}}^{\text{д}};\ P_{\text{но}} \leqslant P_{\text{но}}^{\text{д}}\ \left(\alpha_i \leqslant \alpha_i^{\text{д}};\ \beta_i \leqslant \beta_i^{\text{д}}\right).$$

Для расчёта фактических значений перечисленных выше показателей разработаны аналитические, графические и табличные методы, специальные компьютерные программы.

Аналитические методы определения вероятностей ложного $P_{\text{ло}}$ и необнаруженного $P_{\text{но}}$ отказов позволяют получить высокую точность, но являются довольно сложными. Графические методы наименее точны и предназначены для прикидочных расчётов. Применение компьютера при определении вероятностей ложного и необнаруженного отказов позволяет рассчитать их значения до шестого-седьмого знака. Таблицы для определения показателей

достоверности контроля составляют с использованием программ, реализующих численные методы интегрирования [5].

Рассмотрим несколько подходов к решению задачи выбора СИ для измерительного контроля параметров при эксплуатации образца АТ.

Для определения достоверности контроля параметров образца АТ находят значения условных вероятностей ложного α_i и необнаруженного β_i отказов (ошибок первого и второго рода) по формулам [6]

$$\alpha_i = \int_{a_i}^{b_i} \varphi_{1i}(\xi)\left[\int_{-\infty}^{a_i^k-\xi} \varphi_{2i}(t)dt + \int_{b_i^k-\xi}^{\infty} \varphi_{2i}(t)dt\right]d\xi;$$

$$\beta_i = \int_{-\infty}^{a_i} \varphi_{1i}(\xi)\left[\int_{a_i^k-\xi}^{b_i^k-\xi} \varphi_{2i}(t)dt\right]d\xi + \int_{b_i}^{\infty} \phi_{1i}(\xi)\left[\int_{a_i^k-\xi}^{b_i^k-\xi} \varphi_{2i}(t)dt\right]d\xi,$$

где $\varphi_{1i}(\xi)$ — плотность распределения вероятностей значений контролируемого параметра ξ; $\varphi_{2i}(t)$ — плотность распределения вероятностей погрешности измерения параметра; a_i, b_i — нижнее и верхнее предельно допустимые значения контролируемого параметра; a_i^k, b_i^k — нижнее и верхнее предельно допустимые значения контролируемого параметра, используемые при измерительном контроле.

Зная указанную выше зависимость и задаваясь требуемыми значениями условных вероятностей ложного α_i и необнаруженного β_i отказов, устанавливают требования к погрешности измерения параметров образца АТ и, следовательно, к выбору СИ.

При нормальном законе распределения вероятности параметра образца АТ и погрешности его измерения, используя допущение о том, что контрольный допуск совпадает с допуском на параметр $\left(a_i^k = a_i, b_i^k = b_i\right)$ и математическое ожидание погрешности измерения равно нулю, условные вероятности ложного и необнаруженного отказов рассчитывают по следующему алгоритму.

Определяются нормированное предельно допустимое отклонение параметра от математического ожидания x_i и коэффициент несимметрии допуска k_i по следующим формулам [6]:

для $m_i - a_i \geqslant b_i - m_i$

$$x_i = \frac{m_i - a_i}{\sigma_i};$$

$$k_i = \frac{b_i - m_i}{m_i - a_i},$$

где m_i — математическое ожидание параметра; σ_i — среднее квадратичное отклонение контролируемого параметра;

для $m_i - a_i < b_i - m_i$

$$x_i = \frac{b_i - m_i}{\sigma_i};$$

$$k_i = \frac{m_i - a_i}{b_i - m_i}.$$

Условные вероятности ложного отказа (ошибка первого рода) и необнаруженного отказа (ошибка второго рода) находятся с помощью выражений

$$\alpha_i = 0{,}5(\alpha(x_i) + \alpha(k_i x_i));$$
$$\beta_i = 0{,}5(\beta(x_i) + \beta(k_i x_i)).$$

В свою очередь, $\alpha(x_i)$, $\alpha(k_i x_i)$, $\beta(x_i)$, $\beta(k_i x_i)$ определяются выражениями

$$\alpha(p_i) \approx \beta(p_i) + e^{-\frac{0{,}42p_i^2}{1+z_i^2} - \frac{0{,}713p_i}{\sqrt{1+z_i^2}}} - e^{-0{,}42p_i^2 - 0{,}713p_i};$$

$$\beta(p_i) \approx \frac{0{,}33z_i\left(1 - \frac{0{,}1z_i}{p_i}\right)}{1 + 0{,}8z_i p_i} e^{-\frac{p_i^2}{2}},$$

где p_i — переменная, принимающая значение x_i или $k_i x_i$; z_i — нормированное среднее квадратичное отклонение погрешности измерения $z_i = \sigma_{\text{и}i}/\sigma_i$; $\sigma_{\text{и}i}$ — среднее квадратичное отклонение погрешности измерения параметра.

Приведённые формулы применимы при выполнении условий $1 \leqslant p_i \leqslant 4$; $0{,}02 \leqslant z_i \leqslant 1$.

На практике значение σ_i ориентировочно принимается равным $2\Delta_{\text{пр.ф}}$, т.е. удвоенному значению основной погрешности СИ.

Для выбора СИ, обеспечивающего измерение контролируемого параметра с заданными условными вероятностями ложного и (или) необнаруженного отказов, необходимо определить среднее квадратичное отклонение погрешности измерения. В этих целях проведём преобразования формулы для условной вероятности необнаруженного отказа

$$\beta(p_i)e^{\frac{p_i^2}{2}} \approx \frac{0{,}33z_{i\text{но}}\left(p_i - 0{,}1z_{i\text{но}}\right)}{p_i(1 + 0{,}8z_{i\text{но}}p_i)},$$

где $z_{i\text{но}}$ — нормированное среднее квадратичное отклонение погрешности измерения при определении условной вероятности необнаруженного отказа.

Принимаем

$$\beta(p_i)\mathrm{e}^{\frac{p_i^2}{2}} = A.$$

Выражение для нормированного среднего квадратичного отклонения погрешности измерения будет иметь вид

$$z_{i\text{но}}^2 + (24,24Ap_i^2 - 10p_i)z_{i\text{но}} + 30,3Ap_i = 0.$$

Находим корни квадратного уравнения:

$$z_{i\text{но}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2},$$

где $B = 24,24Ap_i^2 - 10p_i$; $C = 30,3Ap_i$.

Вычисляем значение среднего квадратичного отклонения погрешности измерения параметра:

$$\sigma_{\text{и}i\text{но}} = z_{i\text{но}}\sigma_i.$$

Преобразуем формулу для определения вероятности ложного отказа

$$R = \alpha(p_i) - \beta(p_i) + \mathrm{e}^{-0,42p_i^2 - 0,713p_i} = \mathrm{e}^{-\frac{0,42p_i}{1+z_i^2} - \frac{0,713p_i}{\sqrt{1+z_i^2}}}.$$

Водим обозначения $X = \sqrt{1 + z_i^2}$; $Y = \ln R$; $Q = -0,42p_i^2$; $U = -0,713p_i$.

Рассчитываем значения X:

$$\ln R = -\frac{0,42p_i}{1 + z_i^2} - \frac{0,713p_i}{\sqrt{1 + z_i^2}};$$

$$Y = \frac{Q}{X^2} + \frac{U}{X};$$

$$YX^2 - UX - Q = 0;$$

$$X = \frac{U \pm \sqrt{U^2 + 4YQ}}{2Y}.$$

Вычисляем значение среднего квадратичного отклонения погрешности измерения параметра:

$$\sigma_{\text{и}i\text{ло}} = z_{i\text{ло}}\sigma_i,$$

где $z_{i\text{ло}} = \sqrt{X^2 - 1}$ — нормированное среднее квадратичное отклонение погрешности измерения при определении вероятности ложного отказа.

Рассчитав значения средних квадратичных отклонений погрешностей измерения параметра для достоверного определения вероятностей необнаруженного отказа $\sigma_{\text{и}i\text{но}}$ и ложного отказа $\sigma_{\text{и}i\text{ло}}$, определяем необходимое СИ и его погрешность в реальных условиях эксплуатации в соответствии с [1, 6].

При выполнении указанных выше условий о равенстве предельно допустимых значений параметра и контрольных допусков на параметр ($a_i^k = a_i$, $b_i^k = b_i$) и условия равенства модуля разности контрольных допусков величине 6σ ($|\alpha_i - \beta_i| = 6\sigma_i$) плотность распределения параметра и погрешности измерения подчинены нормальному закону, поэтому при расчёте среднего квадратичного отклонения погрешности измерения параметра $\sigma_{\text{и}i\text{но}}$ при заданном значении вероятности необнаруженного отказа $P_{\text{но}}$ можно использовать выражение [5]

$$P_{\text{но}} = \frac{0,005\sigma_{\text{и}i\text{но}}}{\sigma_i - \sigma_{\text{и}i\text{но}}}.$$

Преобразовав эту формулу, получим выражение для определения среднего квадратичного отклонения погрешности измерения

$$\sigma_{\text{и}i\text{но}} = \frac{P_{\text{но}}\sigma_i}{P_{\text{но}} + 0,005}.$$

Для определения среднего квадратичного отклонения погрешности измерения при известном значении вероятности ложного отказа используем выражение [5]

$$P_{\text{ло}} = \frac{0,022\sigma_{\text{и}i}}{\sigma_i - \sigma_{\text{и}i}^2 / \sigma_i} + P_{\text{но}},$$

или

$$P_{\text{ло}} = \frac{0,022\sigma_{\text{и}i}}{\sigma_i - \sigma_{\text{и}i}^2 / \sigma_i} + \frac{0,005\sigma_{\text{и}i}}{\sigma_i - \sigma_{\text{и}i}};$$

$$P_{\text{ло}} = \frac{0,022\sigma_{\text{и}i}\sigma_i + 0,005\sigma_{\text{и}i}(\sigma_{\text{и}i} + \sigma_i)}{\sigma_i^2 - \sigma_{\text{и}i}^2};$$

$$0,027\sigma_{\text{и}i}\sigma_i + 0,005\sigma_{\text{и}i}^2 = P_{\text{ло}}\sigma_i^2 - P_{\text{ло}}\sigma_{\text{и}i}^2;$$

$$(P_{\text{ло}} + 0,005)\ \sigma_{\text{и}i}^2 + 0,027\sigma_i\sigma_{\text{и}i} - P_{\text{ло}}\sigma_i^2 = 0.$$

Полученное уравнение решается, как и предыдущее, нахождением корней квадратного уравнения.

Возможен другой подход к решению данной задачи:

$$P_{\text{ло}} = 0,022\frac{\sigma_{\text{и}i}}{(\sigma_i^2 - \sigma_{\text{и}i}^2)/\sigma_i} + P_{\text{но}},$$

или

$$P_{\text{ло}} = 0,022\frac{\sigma_{\text{и}i}\sigma_i}{(\sigma_i - \sigma_{\text{и}i})(\sigma_i + \sigma_{\text{и}i})} + P_{\text{но}}.$$

Преобразуем последнее выражение:

$$P_{\text{ло}} = 0,022\frac{P_{\text{но}}\sigma_i}{0,005(\sigma_i + \sigma_{\text{и}i})} + P_{\text{но}};$$

$$0,005P_{\text{ло}}(\sigma_i + \sigma_{\text{и}i}) = \\ = 0,022\sigma_i P_{\text{но}} + 0,005P_{\text{но}}(\sigma_i + \sigma_{\text{и}i});$$

$$0,005P_{\text{ло}}\sigma_i + 0,005P_{\text{ло}}\sigma_{\text{и}i} = \\ = 0,027\sigma_i P_{\text{но}} + 0,005P_{\text{но}}\sigma_{\text{и}i};$$

$$\sigma_{\text{и}i}\left[0,005(P_{\text{ло}} - P_{\text{но}})\right] = \\ = \sigma_i(0,027P_{\text{но}} - 0,005P_{\text{ло}});$$

$$\sigma_{\text{и}i} = \frac{\sigma_i(5,4P_{\text{но}} - P_{\text{ло}})}{P_{\text{ло}} - P_{\text{но}}}.$$

В качестве функции плотности распределения вероятностей составляющих погрешности измерений, для которых известны только пределы допускаемых значений, при расчётах характеристик погрешности измерений принимают закон равномерной плотности, если отсутствует информация об ином виде распределения. Данный закон распределения в [7] определяется как предпочтительный. В этих же методических указаниях рекомендуется следующая зависимость предела суммарной погрешности измерений параметра от допустимого отклонения параметра $\delta_{\text{п}}$ и вероятности необнаруженного отказа β:

$$\Delta_{\text{пр}} = 4\beta\delta_{\text{п}}.$$

Необходимо учитывать, что при погрешности измерения $\Delta_{\text{изм}}$, подчиняющейся закону равной вероятности:

$$\Delta_{\text{изм}} = \sqrt{3}\sigma_{\text{и}i},$$

предельная погрешность измерения должна быть приблизительно в два раза меньше погрешности, подчиняющейся нормальному закону распределения:

$$\Delta_{\text{изм}} = 3\sigma_{\text{и}i},$$

для получения тех же значений измеряемого параметра.

Возможен случай, когда для равномерного закона распределения при симметричном рассеянии ω параметра относительно номинального значения с $\frac{\omega}{2} = \sqrt{3}\sigma_{\text{и}}$ при условиях, что:

если $\Delta_{\text{изм}} < \left(\frac{\omega - \delta_{\text{п}}}{2}\right)$, то $\Delta_{\text{изм}} = P_{\text{ло}} \cdot 2\omega = P_{\text{но}} \cdot 2\omega$;

если $\Delta_{\text{изм}} > \left(\frac{\omega - \delta_{\text{п}}}{2}\right)$, то $\Delta_{\text{изм}} = P_{\text{ло}} \cdot 2\omega$,

$$\Delta_{\text{изм}} = \frac{P_{\text{но}}\omega\delta_{\text{п}}}{\omega - \delta_{\text{п}}} + 0,25(\omega - \delta_{\text{п}}).$$

Таким образом, зная значения вероятностей ложного и необнаруженного отказов и значение допустимого отклонения параметра, можно рассчитать приблизительное значение погрешности СИ, не прибегая к графическим методам, и в дальнейшем определить класс точности СИ, необходимого для проведения измерительного контроля параметра.

В связи с тем, что при проведении испытаний и эксплуатации образца АТ, как правило, используется один и тот же комплект СИ и средств контроля, для уменьшения себестоимости образца целесообразно выбирать СИ, прошедшие государственные испытания и включенные в Федеральный информационный фонд.

Библиографические ссылки

1. **РД В 319.01.13—98.** Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Оценка метрологического обеспечения. М.: Военное изд-во, 1999. 142 с.

2. **Кузнецов В.А., Исаев Л.К., Шайко И.А.** Метрология / под ред. В.А.Кузнецова. М.: Стандартинформ, 2005. 300 с.

3. **Кузнецов В.А.** Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / под ред. В.А. Кузнецова. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.

4. **ГОСТ 8.401—80.** Классы точности средств измерений. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1981. 12 с.

5. **Сычев Е.И., Храменков В.Н., Шкитин А.Д.** Основы метрологии военной техники. М.: Военное изд-во, 1993. 400 с.

6. **ОСТ 1 00433—81.** Средства контроля технического состояния изделий авиационной техники. Методика определения характеристик инструментальной достоверности контроля. М.: Изд-во ФГУП "НИИСУ", 1983. 24 с.

7. **Методические указания 1.1.269—94.** Методика выбора средств измерений для контроля параметров изделий авиационной техники при их испытаниях. М.: Изд-во ФГУП "НИИСУ", 1994. 12 с.

УДК.621.3.08

Н.М. Парфёнов, канд. техн. наук, **В.Б. Чемоданов**, канд. техн. наук
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)),
А.С. Тимошенков, канд. техн. наук, **Л.И. Кузнецова**
(Московский институт электронной техники (национальный исследовательский университет))

sedennik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Приведены результаты исследований и разработки конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) акселерометра гребенчатого типа. С помощью программы ANSYS на основе модального анализа проведён расчёт конструкции ЧЭ. Показана форма собственных колебаний элемента акселерометра в зависимости от частоты колебаний. Относительное смещение маятника ЧЭ под воздействием силы тяжести вдоль оси чувствительности составляет 0,06 мкм/g.

Ключевые слова: конструкция ЧЭ; акселерометры гребенчатого типа; расчёт по программе ANSYS.

The research and development results of the structure sensing elements (SE) for the plicate accelerometer are adduced based on modal analysis was conducted. Calculation SE design was carried out via the ANSYS software based on modal analysis. The shape of the accelerometer element natural oscillations depending on the oscillation frequency is shown. Relative shift of the SE pendulum under the influence of gravity along the sensitivity axis is 0.06 μm/g.

Keywords: *SE design; plicate accelerometer; calculation by ANSYS program.*

Введение. Применение акселерометров в навигационных системах авиационно-космической техники является относительно дорогим и сложным. Акселерометры могут измерять ускорение, вибрацию в одном или нескольких направлениях в зависимости от выбранного аналогового или цифрового интерфейса [1].

Ряд зарубежных компаний достигли заметных успехов в разработке и производстве МЭМС-датчиков движения, предназначенных преимущественно для бытовой техники, автомобильной промышленности. Ведущее место среди них занимает зарубежная компания STMicroelectronics [2]. Акселерометры имеют широкие функциональные возможности и применяются для измерения углов наклона, сил инерции, ударных нагрузок, вибрации. Отработанные и управляемые единые технологические процессы позволили изготавливать чувствительные элементы (ЧЭ) и электронные блоки в одном устройстве, что способствовало снижению себестоимости акселерометров. Не менее успешное развитие получила технология производства акселерометров на базе поликристаллического кремния.

30-летний опыт работы в производстве акселерометров имеет компания Freescale Semiconductor [3]. Данная фирма выпускает более 50 наименований датчиков линейного ускорения, имеющих 10-, 12- и 14-разрядные акселерометры, характеризующиеся незначительным энергопотреблением. Разработанные устройства с шестью перепрограммируемыми режимами и схемой управления, предусматривающей четыре режима, также позволили существенно снизить энергопотребление. Измерения вибрации, ударов и движения наклона проводились с использованием цифровой обработки сигналов.

Швейцарская фирма Colibrys выпускает высокоточные МЭМС-акселерометры. Эти устройства применяются для измерения параметров буровых скважин в нефтяной промышленности, в авиационно-космической технике и для сейсмических измерений. Акселерометры фирмы Colibrys способны работать в диапазоне температур −55...+125 °С и выдерживать удар до 6000 *g* [4, 5].

Успешные исследования и разработки акселерометров ведутся и в России: в ОАО "Авангард", МИЭТ, НИИ физических измерений (г. Пенза) и др. Сотрудники МИЭТ под руководством доктора технических наук, профессора С.П. Тимошенкова разработали и успешно внедрили в производство акселерометры, инклинометры и гироскопы [6].

В НИИ физических измерений разработаны ёмкостные акселерометры, которые успеш-

но поставляются заказчикам. В процессе изготовления акселерометров использованы современные достижения в области технологии объёмной микромеханики и тонких плёнок [7].

Проектирование нового класса датчиков для инерционной измерительной системы. В данной статье приведены результаты исследований и разработки конструкции и технологии МЭМС-акселерометров, которые могут найти применение как в авиационно-космической, так и в бытовой технике. Расчёт конструкции ЧЭ был проведён с помощью метода конечных элементов по программе ANSYS [8, 9].

В качестве конструкции ЧЭ датчиков для инерционной измерительной системы, а именно МЭМС-акселерометра, разработана гребенчатая структура с продольным перемещением инерционной массы под воздействием ускорения (рис. 1).

Расчёт конструкции ЧЭ микромеханического микроакселерометра проводился помощью конечно-элементного метода по программе ANSYS с учётом результатов модального анализа (анализ проводится для определения частот и собственных колебаний конструкций)

Модальный анализ показал (таблица), что рабочая форма колебаний ЧЭ (а значит, и соответствующая степень свободы) является самой мягкой (собственная частота ~3,54 кГц). Паразитные формы колебаний имеют более высокие собственные частоты (более 7,9 кГц), и поэтому практически не влияют на суммарную деформацию подвеса ЧЭ, их вклад в движение ЧЭ минимален. Высокие значения собственных частот являются гарантией отсутствия резонансных эффектов при типовых внешних воздействиях (с частотами до 2 кГц).

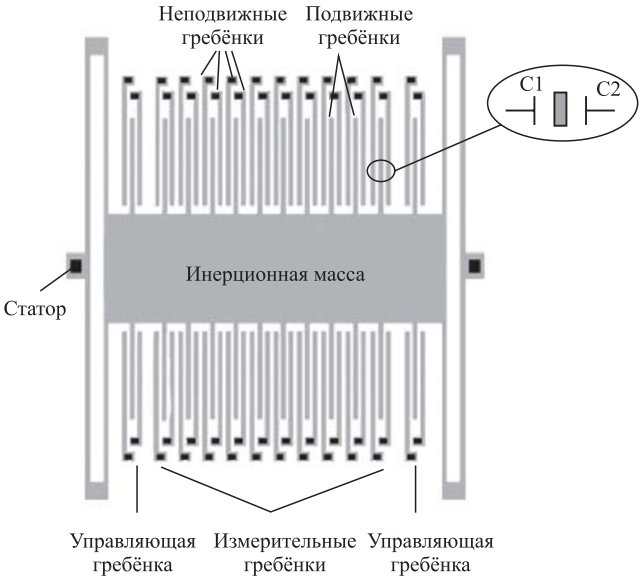
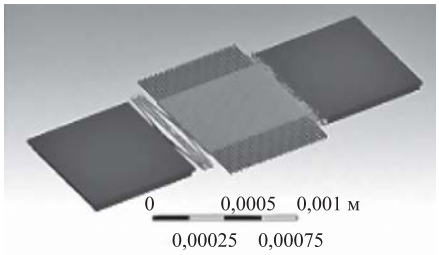
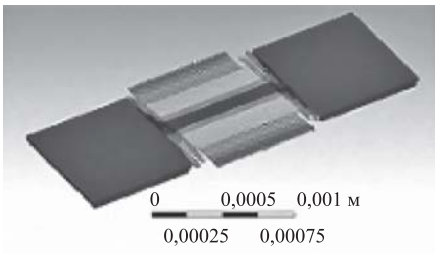
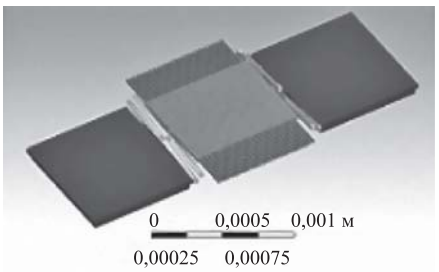


Рис. 1. ЧЭ датчика инерционной измерительной системы гребенчатого типа

Материалом для изготовления ЧЭ служит структура КНИ (кремний-на-изоляторе), в которой в качестве диэлектрика применён диоксид кремния с нанесённым на него слоем стекла, который впоследствии стравливается. Для обеспечения зазора между инерционной массой и статором поверх стекла расположен слой низкоомного монокристаллического кремния, из которого вытравливается ротор.

Инерционная масса, закреплённая на статоре, под воздействием ускорения, приложенного вдоль конструкции, перемещается влево-вправо. В результате воздействия ускорения изменяется расстояние между неподвижными и подвижными гребенками, и следовательно, ёмкость, образованная конденсаторами. Приложенное ускорение можно оценить, измерив разность этих ёмкостей. Кроме того, для оцен-

Результаты модального анализа ЧЭ микроакселерометра

Форма собственных колебаний	Значение собственной частоты, Гц
	3539,8
	7956,9
	8470,6

ки погрешности характеристик ЧЭ использованы управляющие гребёнки (см. рис. 1), на которые подаётся напряжение, и в результате возникает электрическое поле, способное сдвинуть инерционную массу. Оценивая изменение ёмкостей, которое можно измерить с помощью измерительных гребёнок, можно принять решение о наличии или отсутствии погрешности. Значение напряжения, способного придать ускорение инерционной массе, подбирается экспериментально.

Для более точного анализа по программе ANSYS был проведён расчёт перемещения инерционной массы под воздействием ускорения.

Результаты моделирования показывают, что чувствительность ЧЭ $\delta = 2{,}8206 \cdot 10^{-9}$ м.

Поскольку конструкция рассчитана на диапазон до 100 *g*, то при максимальном воздействии (1000 *g*) ЧЭ " залипает".

Конструкция ЧЭ микромеханического акселерометра представляет собой массу *1*, подвешенную на торсионах *2* (рис. 2).

В конструкции предусмотрена ёмкостная система съёма сигнала, представляющая собой 30 дифференциальных пар электродов (см. рис. 1). При воздействии ускорения вдоль оси чувствительности *4* масса *1* перемещается, что приводит к изменению ёмкостей *3*. По изменению ёмкостей можно судить о воздействующем ускорении.

Статический анализ проводился для модели ЧЭ в предположении линейности деформаций подвеса ЧЭ. Расчёт показал, что относительное смещение ЧЭ при действии силы тяжести вдоль оси чувствительности составляет 0,06 мкм/*g*.

Основные параметры разработанного микроакселерометра:

Диапазон измерения, *g*	±0,2; ±1,2; ±5; ±10; ±50; ±100; ±200
Нелинейность, %	До 0,5
Спектральная плотность мощности шума, $g/Гц^{1/2}$	10^{-3}, 10^{-5}
Дрейф нулевого сигнала в диапазоне рабочих температур, *g*	0,005; 0,1
Диапазон рабочих температур, °С	−40...+85

Видно, что параметры в основном отвечают требованиям для данного типа акселерометров. Проводилась контрольная оценка в части диапазона перемещений маятника ЧЭ под воздействием ускорений до 100 *g*. При ускорении более 200 *g* наблюдалась нестабильность технических характеристик ЧЭ.

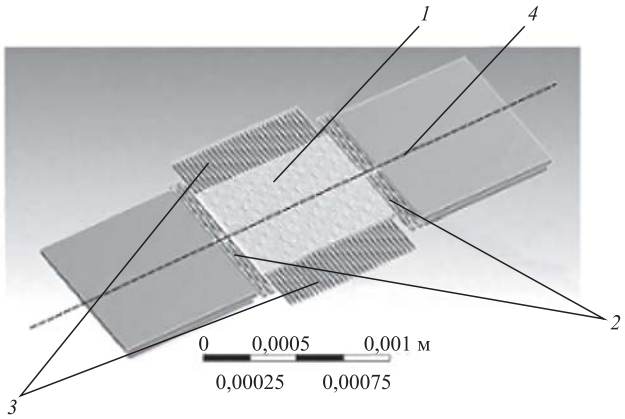


Рис. 2. Геометрическая модель ЧЭ микроакселерометра

Выводы. Разработана конструкция и изготовлен ЧЭ датчика гребенчатой структуры. Исследования показали, что чувствительность образца составляет $2{,}8206 \cdot 10^{-9}$ м. Рассчитанная с помощью программы ANSYS конструкция способна выдержать ускорение 100 *g*. Попытка увеличить его до 1000 *g* приводила к "залипанию" гребёнки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания по проекту № 813, 2014, руководитель А.А. Афонин.

Библиографические ссылки

1. **Тузов А**. Датчики для измерения параметров движения на основе МЭМС-технологии. Ч. 1. Инерциальные датчики средней точности // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2011. № 1. С. 72—78.

2. **Меджахед Д.** МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы // Электронные компоненты. 2009. № 12. С. 53—57.

3. **Губа А.** Ускорение в инновациях: новые акселерометры компании Freescale // Электронные компоненты. 2011. № 4. С. 64—67.

4. **Балакирев А.** Акселерометры компании Measurement Specialties // Компоненты и технологии. 2007. № 7. С. 69—72.

5. **Сысоева С.С.** Автомобильные акселерометры. Ч. 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых ёмкостных акселерометров // Компоненты и технологии. 2006. № 4. С. 28—39.

6. **Тимошенков С.П., Бойко А.Н., Симонов Б.М**. Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры // Электроника. НТБ. Вып. 2008. № 1. С. 80—82.

7. **Мокров Е.А., Папко А.А**. Акселерометры НИИ физических измерений — элементы микросистемной техники // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 3—9.

8. **Бойко А.Н., Симонов Б.М.** Микромеханические акселерометры: моделирование элементов конструкции и изготовление // Электроника: Наука, Технология. Бизнес. 2009. № 8. С. 100—103.

9. **Гудинаф Ф.** Ёмкостные датчики ускорения, выполненные на основе сочетания объёмной и поверхностной микроэлектроники // Электроника. 1993. № 11—12. С. 86—87.

УДК 004.02

Ю.С. Клочков
(Сургутский государственный университет)
yu.klocochkov@gmail.com

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗБИЕНИЯ НА ФИКСИРОВАННЫЕ ГРУППЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПЛАНОВ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТОДОМ "ЦЕНТР ОЦЕНКИ"

Дано сравнение распределения на фиксированные группы экспертов и участников в рамках построения плана наблюдений метода оценки компетенций персонала "Центр оценки". Анализ критерия мощности повторной встречи доказывает, что использование фиксированных групп на протяжении всего плана наблюдений не менее выгодно, чем переменного разбиения на группы.

Ключевые слова: центр оценки; ассессмент-центр; ротация; организационный план; план наблюдений; компетенция; эксперт; критерии.

A comparison of distributions on fixed group of the experts and participants in the frame of building supervision plan of the evaluation method for "Evaluation Center" staff competency is given. Analysis power criterion of the repeated meeting proves that the use of fixed group throughout the supervision plan not less favorably than the variable division into groups.

Keywords: evaluation center; assessment-center; rotation; organization plan; supervision plan; competence; expert; criteria.

Введение. Для крупных организаций с каждым днём всё более остро встаёт проблема оценки персонала. Оценка персонала — это процедура, направленная на определение текущей эффективности сотрудника (связанной с выполнением непосредственных обязанностей и достижением целей компании), его личностно-профессиональных особенностей и потенциала [1]. Адекватная полная оценка работника позволяет максимально эффективно использовать функции резерва кадров и планировать развитие профессиональных и личностно-управленческих качеств работников. На сегодняшний день одними из наиболее качественных оценок являются оценки на базе компетенций. Компетенция — это уникальная совокупность психофизиологических особенностей, ценностей, установок, мотиваций, знаний, умений и навыков сотрудника, приводящая к эффективному поведению в производственной ситуации. Компетенции могут быть описаны в терминах наблюдаемого поведения и могут быть замерены формально [2].

Одним из самых точных методов комплексной оценки персонала на базе компетенций является метод "Центр оценки" (ЦО). Центр оценки (в российской литературе встречается наименование этого метода — "ассессмент-центр", англ. — assessment center) — комплексный метод диагностики потенциальной успешности в профессиональной деятельности, включающий набор различных частных методов, основой которого является оценка поведения участников группой наблюдателей-экспертов в моделирующих упражнениях [3]. Цель ЦО — оценка потенциальной успешности в профессиональной деятельности. Эта деятельность может быть задана конкретно (например, должность в организации) или по типу деятельности (например, определённый уровень управления). ЦО также используется для анализа компетенций сотрудников, состоящих в резерве кадров. ЦО позволяет выявить те компетенции, которые необходимо развивать сотрудникам для соответствия должности, в резерве на которую они планируются. При подготовке ЦО одним из трудоёмких процессов является формирование его организационного плана, который содержит две основных части: расписание и план наблюдения.

Расписание — это последовательность и точное время начала/окончания упражнений и других методик.

План наблюдения — это таблица, в которой указано, каких участников в каждом упражнении оценивают конкретные наблюдатели-эксперты. В плане отмечаются помещения, в которых проводится каждое упраж-

нение, а также кто из участников и наблюдателей работает в этом помещении.

Таким образом, на этапе планирования ЦО необходимо сформировать организационный план так, чтобы использование экспертов, аудиторий и времени было наиболее эффективным.

Математическая модель организационного плана ЦО. Для формализации критериев сравнения организационных планов была построена математическая модель на основе теории множеств, векторов и бинарных отношений на множества [4].

Пусть ЦО характеризуется следующими объектами:

M — множество участников;

E — множество экспертов;

$U = \langle u_1, u_2, u_3, ..., u_n\rangle$ — вектор последовательно выполняемых упражнений, где u_i — i-е упражнение, $i \in [1; n]$, n — общее количество упражнений;

K — множество возможных компетенций. Будем считать, что u_i находится в отношениях с $k_j \in K$, если компетенция k_j оценивается упражнением u_i;

$T = \langle t_1, t_2, t_3, ..., t_n\rangle$ — вектор времени, затрачиваемый одним участником на прохождение каждого упражнения, где t_i — время прохождения одним участником упражнения u_i, $i \in [1; n]$;

F — множество функций, отображающих общее время выполнения упражнения при условиях определённого разбиения участников и экспертов на группы $f \in F$:

$$f(M, E, t_i) = \\ = \left\{ \begin{array}{c} \left(\langle M_1, E_1\rangle, \langle M_2, E_2\rangle, \ldots, \langle M_{l_1}, E_{l_1}\rangle, \tilde{t}_1\right), \\ \left(\langle M'_1, E'_1\rangle, \langle M'_2, E'_2\rangle, \ldots, \langle M'_{l_1}, E'_{l_1}\rangle, \tilde{t}_2\right), \ldots \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где в множестве каждый вектор состоит из вариантов разбиения на группы участников и экспертов $M_1 \cup M_2 \cup \ldots \cup M_{l_j} = M$, $E_1 \cup E_2 \cup \ldots \cup E_{l_j} = E$, а $\tilde{t}_j$ — общее время выполнения i-го упражнения при j-м разбиении $j \in [1; z_i]$; z_i — количество различных вариантов разбиения i-го упражнения.

Будем считать, что вариант разбиения на группы функцией $f \in F$ в отношении с упражнением u_i, если упражнение u_i допускает возможность описанного варианта разбиения.

Пусть выбрано l-е разбиение на группы, тогда определим отношение $(m_i, e_j)_q$, где

$$m_i \in M,\ e_j \in E, \\ \exists p : m_i \in M_p,\ e_j \in E_p,\ \langle M_p, E_p\rangle \in [f(M, E, t_q)]_l, \quad (2)$$

т.е. в q-м упражнении j-м экспертом наблюдался i-й участник.

Определим построение плана наблюдений ЦО в терминах теории множеств как

$$v = \left\langle \begin{array}{c} \left[f_1(M, E, t_1)\right]_{l_1}, \left[f_2(M, E, t_2)\right]_{l_2}, \\ \ldots \left[f_n(M, E, t_n)\right]_{l_n} \end{array} \right\rangle. \quad (3)$$

Тогда постановка задачи сводится к выбору лучшего элемента из множества планов наблюдений ЦО $V = \{v\}$, для которого $\sum_{i=1}^{n} \tilde{t}_{l_i} < t_{\max}$, где $t_{\max}$ — общее время, запланированное на проведение всех упражнений.

Для определения лучшего разбиения экспертов и участников на группы были сформулированы следующие критерии мощности сравнения планов [4]:

1) наблюдаемости участников;
2) наблюдений;
3) повторной встречи;
4) компетенций.

Докажем, что фиксированные группы участников и экспертов более выгодны, чем переменные. Не уменьшая общности, рассмотрим построение плана оценки для двух аудиторий. Предположим, что группы участников и экспертов разделены на группы $M_1 \cup M_2 = M$ и $E_1 \cup E_2 = E$ соответственно и эти группы распределены между собой в упражнениях так, чтобы формировать лучшее разбиение в соответствии с определёнными ранее критериями. Тогда для оптимизации по критериям мощности наблюдаемости участников и мощности наблюдений необходимо, чтобы эксперты и участники были распределены равномерно [5]. Для оптимизации по критерию мощности повторной встречи должно быть минимальным значение:

$$H(v) = \max_{i,j} \left(h\left(m_i, e_j\right)\right) = \max_{i,j} \left(\left|\left(m_i, e_j\right)_q\right|\right), \\ \forall q \in [1, n], \quad (4)$$

где $h(m_i, e_j) = |(m_i, e_j)_q|$, $\forall q \in [1, n]$.

Так как для $\forall m_1;\ m'_1 \in M_1;\ \forall e_1;\ e'_1 \in E_1$ встречи участников с экспертами происходят только в тех упражнениях q, когда $\langle M_1, E_1\rangle \in [f(M, E, t_q)]_l$, следовательно, $h(m_1, e_1) = h(m'_1, e'_1)$, $\forall m_1, m'_1 \in M_1, \forall e_1,\ e'_1 \in E_1$. Тогда для постоян-

ного разбиения на группы для двух аудиторий из (4) следует:

$$H_{\text{п.р}}(v) = \max_{i,j}\left(h\left(m_i, e_j\right)\right) = \\ = \max\left(h\left(m_1, e_1\right), h\left(m_1, e_2\right), h\left(m_2, e_1\right), h\left(m_2, e_2\right)\right), \quad (5)$$

где $m_1 \in M_1$; $m_2 \in M_2$; $e_1 \in E_1$; $e_2 \in E_2$.

Заметим, что если в упражнении q участники M_1 и эксперты E_1 находятся в одной аудитории, т.е. выполняется условие $\langle M_1, E_1\rangle \in \in [f(M, E, t_q)]_l$, то эксперты и участники, не вошедшие в M_1 и E_1, соответственно находятся во второй аудитории, т.е. для упражнения q выполняется условие $\langle M_2, E_2\rangle \in [f(M, E, t_q)]_l$. Тогда количество упражнений, в которых встречаются участники $m_1 \in M_1$ с экспертами $e_1 \in E_1$ равно количеству упражнений, в которых встречаются участники $m_2 \in M_2$ с экспертами $e_2 \in E_2$, т.е. $h(m_1, e_1) = h(m_2, e_2)$. Аналогично $h(m_1, e_2) = h(m_2, e_1)$. Тогда из выражения (5) следует:

$$H(v_{\text{п.р}}) = \max(h(m_1, e_1), h(m_1, e_2), h(m_2, e_1), \\ h(m_2, e_2) = \max(h(m_1, e_1), h(m_1, e_2). \quad (6)$$

Рассмотрим влияние на изменение значения критерия $H(v)$, если в одном из упражнений двух участников поменять местами. Не уменьшая общности, рассмотрим новое разбиение, при котором $m'_1 \in M_2$, $m'_2 \in M_1$ в упражнении q и $m'_1 \in M_1$, $m'_2 \in M_2$ $\forall q' \neq q$. Обозначим группы экспертов, наблюдающие за группами участников M_1 и M_2, как E_1 и E_2 соответственно, т.е.

$$\langle M_1, E_1\rangle, \langle M_2, E_2\rangle \in [f(M, E, t_q)]_l. \quad (7)$$

Тогда из (4) следует:

$$H(v'_{\text{п.р}}) = \max_{i,j}\left(h\left(m_i, e_j\right)\right) = \\ = \max\left(h\left(m_1, e_1\right), h\left(m_1, e_2\right), h\left(m_2, e_1\right), h\left(m_2, e_2\right), \\ h\left(m'_1, e_1\right), h\left(m'_1, e_2\right), h\left(m'_2, e_1\right), h\left(m'_2, e_2\right)\right) = \\ = \max\left(h\left(m_1, e_1\right), h\left(m_1, e_2\right), h\left(m'_1, e_1\right), h\left(m'_1, e_2\right)\right). \quad (8)$$

Заметим, что из (4) и (7) следует, что $h\left(m_1, e_1\right) > h\left(m'_1, e_1\right)$ и $h\left(m'_1, e_2\right) > h\left(m_1, e_2\right)$, тогда из (8) следует:

$$H(v'_{\text{п.р}}) = \max\left(h\left(m_1, e_1\right), h\left(m'_1, e_2\right)\right) \leqslant \\ \leqslant \max\left(h\left(m_1, e_1\right), h\left(m_1, e_2\right)\right) = H(v_{\text{п.р}}), \quad (9)$$

т.е. значение критерия мощности повторной встречи принимает большее значение, следовательно, разбиение $v'_{\text{п.р}}$ хуже, чем разбиение $v_{\text{п.р}}$.

Таким образом, отклонение от постоянного разбиения на группы $v'_{\text{п.р}}$ не может быть лучше, чем $v_{\text{п.р}}$. Полученные выводы можно подтвердить и расширить эмпирическими рассуждениями. Вследствие того, что изменение групп только частично и остаётся хотя бы по одному участнику в "начальных" группах участников, то $H(v'_{\text{п.р}})$ при определении максимума содержит все элементы начального разбиения, следовательно, $H(v'_{\text{п.р}})$ не может быть меньше $H(v_{\text{п.р}})$, из чего следует, что $v_{\text{п.р}}$ не может быть лучше, чем $v'_{\text{п.р}}$. Очевидно, что используя аналогичные рассуждения, можно доказать, что изменение местами экспертов между группами при фиксированных группах участников также не может улучшить разбиение экспертов и участников на группы с точки зрения критерия мощности повторной встречи.

Очевидно, что аналогичные рассуждения относительно критерия мощности компетенций могут гарантировать, что фиксированные группы участников и экспертов более выгодны, чем переменные.

Заключение. Доказано, что лучшее из разбиений экспертов и участников на группы при построении планов оценки будет при фиксированных группах участников и экспертов во всех упражнениях. Следовательно, для нахождения оптимального разбиения экспертов и участников на группы по установленным критериям достаточно оптимизировать взаимное расположение групп.

Библиографические ссылки

1. **Беспалов И.** Оценка персонала. Общая информация // Практика современного подхода. URL: http://www.sbsc.ru/business/evaluation.html (дата обращения: 23.06.2016).

2. **Томская А.Г.** Лидерство как ключевая компетенция руководителя // Тезисы докладов конференции "Бизнес. Общество. Человек" С. 175. URL: http://orgpsyjournal.hse.ru/2013-3-5. Приложение/116367424.html (дата обращения: 23.06.2016).

3. **Вучетич Е.В., Гофман Д., Ерофеев А.К., Лурье Е.В., Мальцева М.Ю., Михеев Ю., Полетаева Ю.С., Сергиенко С., Симоненко С.И., Синицына Ю.Д., Умнов С., Хватинина Т., Шмелёв А.Г.** Российский стандарт центра оценки // Организационная психология. 2013. Т. 3. № 2. С. 8—32. URL: http://orgpsyjournal.hse.ru/2013-3-2.html (дата обращения: 23.06.2016).

4. **Клочков Ю.С., Мокшина В.С.** Моделирование организационных планов в методе "Центр оценки" // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 10. С. 66—70.

5. **Клочков Ю.С., Микшина В.С.** Оптимизация выборки планов наблюдения в методе "Центр оценки" при использовании критерия мощности наблюдений // Материалы к конференции "Современный научный потенциал — 2015". URL:http://www.rusnauka.com/9_SNP_2015/Economics.htm (дата обращения: 23.06.2016).

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Исследование влияния несовпадения технологических и конструкторских баз на точность координирующих размеров поверхностей детали. *Вестник машиностроения. 2016. № 9.*

Установлено, что несовпадение конструкторских и технологических баз может быть полным и частичным. Показано, что при несовпадении баз необходимо учитывать их характер (явные, скрытые), число возникающих технологических размерных цепей и размеры составляющих их звеньев.

Ситуация blow-up в оценках некоторых технологических рисков на примере модельной задачи нелинейного теплопереноса. *Вестник машиностроения. 2016. № 9.*

Предложены метод оценки возможности возникновения ситуации blow-up для широкого класса эмпирических температурных зависимостей коэффициентов нелинейного уравнения теплопереноса с тепловым источником и алгоритм расчёта критических времени и размера области теплопереноса, позволяющий при планировании эксперимента исключить «тупиковые» направления его проведения.

Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов. *Вестник машиностроения. 2016. № 9.*

Показаны новые возможности синтеза пучком ионов многокомпонентных композиционных материалов (КМ) с программируемой структурой из порошков разного химического состава. Предложена установка для реализации синтеза КМ.

Современные материалы и эффективные литейные технологии изготовления деталей дизельных двигателей с повышенными эксплуатационными характеристиками. *Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 9.*

Рассмотрены прочностные и основные эксплуатационные характеристики высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом и эффективные технологии изготовления из него базовых деталей мощных дизельных двигателей. На примерах изготовления реальных отливок показаны перспективы производства дизельных двигателей с использованием современных материалов и инновационных технологий, обеспечивающих высокие технические характеристики, эксплуатационную надёжность и конкурентоспособность выпускаемых силовых агрегатов.

Конечно-элементное моделирование процесса высадки концов насосно-компрессорных труб с удлинённой высаженной частью. *Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 9.*

Проведено моделирование процесса наружной высадки концов насосно-компрессорных труб с удлинённой высаженной частью из коррозионно-стойких сталей. Получены значения сил, действующих на оборудование высадочного пресса, которые позволяют оценить для различных типоразмеров труб возможность проведения процесса наружной высадки на заданном типе оборудования.

Влияние химического состава на условия начала динамической рекристаллизации в двухфазных сталях. *Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 9.*

Выполнены расчёт и анализ влияния химического состава двухфазных сталей на критическую деформацию для динамической рекристаллизации при горячей деформации.

Технологические системы плазменного градиентного упрочнения деталей. *Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 9.*

Рассмотрены перспективы использования плазменной поверхностной обработки для повышения износостойкости стальных изделий. Процесс плазменной поверхностной градиентной обработки рассмотрен как технологическая система, в которой все параметры взаимосвязаны и выбор значений регулируемых параметров должен производиться с учётом этих связей. Приведён пример реализации данного подхода для упрочнения направляющих металлорежущих станков.