Автоматизация. Современные ехнологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Ван Мэйлин д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)

Легтярёв Ю.И. д.т.н., проф., МАЙ

Елисеев В.А. д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич.

менеджмента

- д.э.н., проф., <u>МГУПС</u> (МИИТ) Иванов А.П. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
— д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
— д.т.н., проф., МГУПИ Криони Н.К. Мальцева С.В.

Микаева С.А.

Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Нефёдов Е.И. д.ф.-м.н., ЙРЭ РАН

д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина» Никифоров В.М.

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

д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова Шибанов Г.П.

д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша) Янович Е.А.

Редактор — Лутовинина О.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

2016

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО

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

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г. за № 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. 2A, стр. 2.

Тел.: (495) 661-03-36

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES
Громов И.Ю., Кожевников А.М. Программа автоматизированного синтеза систем обеспечения тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры	Gromov I.Yu., Kozhevnikov A.M. The automatic synthesis program of the ensuring systems for radio-electronic equipment thermal modes
Ивашов Е.Н. , Кравченко Н.П. , Федотов К.Д. , Яговцев В.О. Алгоритмы автоматизированного выполнения проектных работ для устройств наноперемещений	Ivashov E.N., Kravchenko N.P., Fedotov K.D., Yagovtsev V.O. Algorithms of the facilities automatic designing for nanodisplacement
Хусаинова Г.Я. Исследование температурных полей при стационарном течении аномальных жидкостей 13	Khusainova G.Ya. Investigation of temperature fields at the steady flow of abnormal fluid
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	MODERN TECHNOLOGY
Семёнов А.Д., Авдеева О.В., Никиткин А.С. Автоматизация процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов методом компьютерного моделирования	Semenov A.D., Avdeeva O.V., Nikitkin A.S. The process automation of the diamond grinding wheels EDM profiling by means of computer simulation method
ского аппарата на малое небесное тело при разных условиях закрепления	landing on a small celestial body at the different fastening conditions
СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	MODERN INFORMATION TECHNOLOGY
Алфимцев А.Н., Кукин П.А. Автоматизация визуальной оценки городского пейзажа методами компьютерного зрения	Alfimtsev A.N., Kukin P.A. The visual assessment automation of the urban landscape by computer vision methods
Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Защитное покрытие для источников излучения	Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boychuk M.I. Protective coating for radiation sources
СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ	SYSTEMS AND CONTROL DEVICES
Дробышев Д.В., Неусыпин К.А. Использование генетических алгоритмов для исследования эффекта транспирации в вакуумных камерах	Drobyshev D.V., Neusypin K.A. Genetic algorithms utilization for study the effect of transpiration in vacuum chambers
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES
Андронов А.В. Научно обоснованная методика принятия управленческих решений по выбору варианта модернизации авиационного комплекса военно-транспортной авиации 45	Andronov A.V. Intelligent methodology of the administrative decisions acceptance for the modernization version choice of military transport aircraft aviation complex 45
Журнал распространяется по подписке, которую мо	жно оформить в любом почтовом отделении

CONTENTS

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); телефоны для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 28.04.2016.Отпечатано в ООО "Канцлер"Подписано в печать 26.05.2016.150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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



АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.38

И.Ю. Громов, А.М. Кожевников, д-р техн. наук, проф. (Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета "Высшая школа экономики")

prostoe@gmail.com

ПРОГРАММА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Описан метод автоматизированной параметрической и структурной оптимизации систем обеспечения теплового режима бортовой и переносной радиоэлектронной аппаратуры с использованием современных информационных технологий.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура; оптимизация; проектирование; автоматизация; тепловой режим.

The method of automatic parametric and structural optimization of the ensuiring systems for board and portable electronic radio-equipment thermal mode with the use of modern information technologies is described.

Keywords: radio-electronic equipment; optimization; designing; automation; thermal mode.

Введение. Исходя из требований нормативно-технической документации по тепловым режимам, на ранних этапах проектирования необходимо оптимально выбрать конструкцию системы охлаждения, элементную базу и режимы электрорадиоизделий (ЭРИ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), обеспечивающие необходимую надёжность РЭА. Указанный выбор должен исключить ошибки в проектировании на более поздних этапах.

Предложен метод, позволяющий расширить систему автоматизированного проектирования РЭА и автоматизировать процесс оптимального выбора как систем терморегулирования и термостатирования для ЭРИ и блока РЭА, так и их параметров. Такой процесс одновременно структурной и параметрической оптимизации определяется как синтез систем обеспечения теплового режима (СОТР). В качестве рассматриваемого типа РЭА выбраны бортовые и переносные блоки, как наиболее чувствительные к массе, габаритам и потреблению энергии.

В большинстве источников, в первую очередь, затрагивается вопрос параметрической оптимизации тепловых систем [1]. При этом проблема одновременной структурной оптимизации, как правило, сводится к итеративному поиску простым сравнением различных систем терморегулирования [2], что трудоёмко и неэффективно при расчёте сложных моделей

РЭА. Ниже показана реализация принципиально иного подхода к синтезу данных систем, основываясь на оценке эффективности влияния параметров СОТР на тепловой режим РЭА.

Для выполнения требования к тепловому режиму каждого ЭРИ могут использоваться различные средства терморегулирования: локальные радиаторы, вентиляторы, теплоотводящие шины, термоэлектронные модули (ТЭМ) Пельтье, тепловые трубы и т.д. (рис. 1, см. обложку), которые объединяются в структуру СОТР, связанную с каждым охлаждаемым ЭРИ.

Критерий оптимальности. В качестве модели теплообмена блока РЭА в процессе оптимального синтеза используется тепловая схема, выполненная по принципам электротепловой аналогии. Концепция метода оптимизации построена на анализе температурного поля РЭА, вычисляемого по модели теплообмена в РЭА после пошагового изменения параметров СОТР. При определении направления движения к оптимуму изменение значения каждого параметра определяется вычислением на очередном шаге оптимизации критерия оптимальности для блока РЭА и оптимального направления изменения параметра для каждого элемента СОТР, присутствующего в модели.

Критерий отражает эффективность конфигурации СОТР в виде взаимозависимости затрат на реализацию и получаемого теплового эффекта. При этом затраты на реализацию

составляет сумма, включающая стоимость средств СОТР, массы и потребляемой ими мощности, а получаемый эффект — уменьшение отклонения температуры на ЭРИ от заданных значений, необходимых для обеспечения требуемой надёжности.

Для реализации указанной выше взаимозависимости в качестве критерия оптимальности для блока РЭА предлагается минимум целевой функции (ЦФ) F для n средств обеспечения теплового режима и m обеспечиваемых температур на ЭРИ в узлах тепловой модели:

$$F(q) = \left(\sum_{i=1}^{l} C_{i} + \lambda_{p} \sum_{i=1}^{n} c_{p,i} P_{i} + \lambda_{M} \sum_{i=1}^{n} c_{M,i} M_{i}\right) \times \left(\lambda_{l} \sum_{j=1}^{m} \left(T_{r} - k_{l} T_{cl,j}\right)^{2} + \lambda_{h} \sum_{j=1}^{m} \left(T_{r} - k_{h} T_{ch,j}\right)^{2}\right),$$
(1)

где $Q = (q_1, ..., q_n)$ — вектор параметров элементов системы с ограничениями (тепловое сопротивление, расход энергии, параметры фитиля для тепловых труб (ТТ), ток питания для ТЭМ Пельтье и т.п.); n — количество ЭРИ с применением индивидуальных средств обеспечения теплового режима; m — общее количество ЭРИ; λ_l , λ_h , λ_p , $\lambda_{\!\scriptscriptstyle M}$ — весовые коэффициенты важности учёта видов требований к нижнему и верхнему значениям температур ЭРИ, потребляемой мощности и массе соответственно; k_{l} , k_{h} — коэффициенты запаса по температуре; T_r — расчётные температуры на ЭРИ в *j*-м узле тепловой модели; $T_{cl, j}$, $T_{ch, j}$ — нижняя допустимая и верхняя допустимая температуры j-го ЭРИ соответственно; P_i — потребляемая мощность средства СОТР для обеспечения теплового режима i-го ЭРИ; M_i — масса средства СОТР i-го ЭРИ; l, C_i — количество всех средств СОТР и стоимость i-го средства соответственно.

В зависимости от выбираемого метода оптимизации к ЦФ добавляются штрафные

Таблица 1 Применяемые стоимостные функции для средств СОТР

Тип средства СОТР	Стоимостная функция
Пластинчатые радиаторы	$C = 0.5 \frac{D_l}{D_{l,\min}} + 0.2 \frac{H_r}{H_{r,\min}} + 0.3 \frac{(N_r D_{elr} + N_r D_{elp} - D_{elp})}{(N_{r,\min} D_{elr,\min} + N_r D_{elp,\min} - D_{elp,\min})}$
Тепловые трубы от ЭРИ на корпус РЭА	$C = 0.1 \frac{d}{d_{\min}} + 0.8 \frac{w}{w_{\min}} + 0.1 \frac{Q}{Q_{\min}}$

функции, учитывающие ограничения на векторы Q и T.

Требуется, чтобы выбранное решение было наиболее оптимальным с точки зрения сто-имости применения тех или иных средств СОТР. В связи с этим важной особенностью предлагаемого метода является возможность учёта целесообразности применения того или иного средства СОТР для ЭРИ или для блока РЭА в целом. Это достигается с помощью учёта индивидуального экспертно-ценового параметра — стоимости, характеризующей затраты на применение.

Стоимость (C) индивидуального средства СОТР или СОТР блока РЭА в общем виде определяют [3]:

$$C = f(q). (2)$$

В процессе практической оптимизации C представляют в форме линейной или полиноминальной функции, примеры которой представлены в табл. 1.

Математическое обеспечение метода синтеза. Синтез средств обеспечения теплового режима подразумевает структурную и параметрическую оптимизацию. В предлагаемом методе производится поиск наиболее эффективного средства СОТР и подстановка его электротеплового аналога в тепловую модель в автоматическом режиме. Данный процесс неразрывно связан с поиском оптимальных параметров всех элементов тепловой схемы.

Для каждого синтезируемого средства СОТР специалистом назначаются возможные варианты замены либо автоматически рассматриваются все возможные.

Необходимость замены средства СОТР на текущем шаге оптимизации определяется с помощью матрицы G размера $k \times p$ и векторстолбца H размера p:

$$G = \begin{bmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,p} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{k,1} & \cdots & g_{k,p} \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \cdots \\ h_p \end{bmatrix},$$

где $G_{i,\,j}=g_{i,\,j}$ для каждого j-го параметра i-го средства обеспечения из набора k возможных средств СОТР для синтезируемой ветви тепловой модели; p — максимально возможное количество параметров для рассматриваемых средств СОТР. Так как у средства СОТР, как правило, разное число параметров, то матрица выравнивается заменой недостающих нулями; $H_{i,\,j}=1$, если i-я СОТР рассматривается в процессе оптимизации, или $H_{i,\,j}=0$ — в противном случае.

Степень целесообразности изменения каждого параметра элемента системы на текущем шаге оптимизации j математически оценивается выделением соотношения относительной чувствительности целевой функции к изменению параметра средства СОТР и абсолютной чувствительности стоимости средства СОТР к изменению этого параметра:

$$g_{i,j} = \left(\frac{\frac{q_i}{F} \frac{\partial F}{\partial q_i}}{\frac{\partial C_i}{\partial q_i}}\right),\tag{4}$$

где $F - \mathbf{U}\Phi$ (1); C_i , q_i — стоимость и параметр для i-го индивидуального средства обеспечения соответственно.

Для каждого параметрически синтезируемого средства СОТР находится максимальный элемент из S:

$$[S]_{p} = [G][H],$$

который определяет средство СОТР с параметрами, обеспечивающими наиболее эффективное влияние на ЦФ (1) по соотношению эффект/стоимость (4).

Структурный синтез выполняется в процессе параметрической оптимизации в результате исключения неэффективных средств СОТР, сравниваемых с более эффективными для достижения минимума ЦФ.

Реализация метода в программе и полученные результаты. Разработан алгоритм и программа оптимального синтеза тепловой модели. Схема алгоритма представлена на рис. 2 (см. обложку) и включает ключевые этапы оптимизации СОТР. Очевидные этапы инициализации, загрузки тепловой схемы, ввод ограничений на параметры элементов системы терморегулирования и т.п. не показаны.

В качестве метода оптимизации используется модифицированный градиентный метод наискорейшего спуска с дроблением шага [4], который позволяет рассматривать параметры средств СОТР последовательно, ограничиваясь при этом производными первого порядка, уже полученными на этапе блока 5 и производить синтез схемы тепловой модели при переходе от одного варьируемого параметра к другому (см. блоки 7—11).

Результаты и анализ метода синтеза. Рассмотрим оптимальный синтез СОТР герметичного блока РЭА, включающего три платы

бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ), две платы устройства обмена и одну плату распределителя питания, составляющие блок этажерочного типа с алюминиевым основанием и кожухом при коэффициенте теплоотдачи по наружному воздуху 2 Вт·м²/К в качестве граничных условий. Необходимо оценить целесообразность применения алюминиевых радиаторов на ЭРИ по сравнению с медными тепловыми трубами (ТТ), зоны конденсации которых выводятся на корпус. Печатные платы блока имеют семь ключевых ЭРИ со значением тепловыделения от 2 до 10 Вт.

Поиск оптимальных параметров ТТ с исходными данными: ограничения на диаметр d от 6 до 20 мм, длина 280 мм, корпус — медь, толщина стенки $\delta_{\rm cr}=0.5$ мм, фитиль — медная сетка с ячеистостью $N=7.87\cdot 10^{-3}$ м $^{-1}$, диаметр проволоки $d_{\rm n}=6.25\cdot 10^{-5}$ м; рабочая жидкость — H_2O .

Исходные данные для пластинчатых радиаторов: ограничения на габариты пластин — не более 50 мм по длине и ширине, не более 20 мм по высоте. Ограничения на температуры $\Im PM$: $0 \le T \le 100$ °C.

Первоначальный синтез СОТР по алгоритму на рис. 2 выполнен без учёта стоимостных функций в ЦФ (1) и при этом получен неудовлетворительный результат, где все средства СОТР в тепловой модели исследуемого блока были заменены алгоритмом на тепловые трубы Hp-1...Hp-7 различного диаметра d с толщиной фитиля w (рис. 3).

Такой вариант эффективен для распределения теплового потока от ЭРИ на корпус, но не подходит с конструктивно-экономической точки зрения, так как использование только

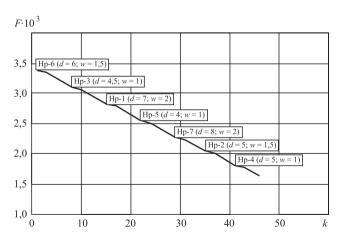


Рис. 3. Зависимость значения целевой функции F от шага оптимизации k для варианта без учёта стоимости средств СОТР

тепловых труб усложняет конструкцию, увеличивает себестоимость и в итоге снижает качество предлагаемого проектного решения. Следовательно, помимо эффективности необходимо учитывать индивидуальный экспертно-ценовой параметр — стоимость, характеризующий затраты на применение того или иного средства СОТР.

В связи с этим разработаны стоимостные функции средств СОТР, применяемых в блоке РЭА (см. табл. 1), учитывающие габаритные характеристики для пластинчатых радиаторов и основные параметры тепловых труб, которые в свою очередь являются ключевыми факторами при проектировании СОТР бортовой РЭА.

В табл. 1 параметры для радиатора: D_l , H_r , N_r , D_{elr} , D_{elp} — длина оребрённой поверхности, высота ребра, количество рёбер, толщина ребра и просвет между рёбрами соответственно; $D_{l, \min}$, $H_{r, \min}$, $N_{r, \min}$, $D_{elr, \min}$, $D_{elp, \min}$ — их минимально возможные значения соответственно; для TT: d — внешний диаметр TT; w — толщина фитиля; Q — расчётная передавая мощность; d_{\min} , w_{\min} , Q_{\min} — минимально возможные значения названных выше параметров соответственно.

Весовые коэффициенты c_i , равные 0,5; 0,2 и т.д. (см. табл. 1), при параметрах функций задаются экспертом и могут быть изменены с сохранением условия:

$$\sum_{i=1}^{n} c_i = 1,$$

где n — количество параметров стоимостной функции; c_i — весовой коэффициент.

Вид стоимостных функций табл. 1 удобен при автоматическом формировании алгоритма подготовки исходных данных оптимиза-

ции, так как минимальные возможные значения (d_{\min} , w_{\min} и т.п.) обычно равны нижним ограничениям на соответствующий параметр.

На втором этапе синтез СОТР выполняли с применением стоимостных функций (см. табл. 1). При этом тепловыделение Q семи ЭРИ (j=[1;7]) задавалось выражением $Q_{i,j}=2i$ Вт для конфигураций с номером i=[1;5] с целью формирования различных начальных условий для алгоритма оптимизации и оценки влияния $Q_{i,j}$ на ЦФ (1).

В результате оптимизации пяти начальных конфигураций для ЭРИ с различным значением тепловыделения найдены конфигурации СОТР с минимумом ЦФ в точке с температурой, не превышающей 90...97 °С для всех ЭРИ, что соответствует ограничениям. Температура самой нагретой зоны воздуха в блоке составила 68...74 °С в зависимости от конфигурации. Программой были предложены замены средств СОТР для ЭРИ на радиаторы или тепловые трубы в зависимости от заданного значения $Q_{i,j}$. Пример для одного ЭРИ представлен в табл. 2.

Зависимость ЦФ F от шага оптимизации k при различных конфигурациях i представлена на рис. 4.

Стабильная минимизация ЦФ с каждым шагом и приближение к минимуму для различных начальных конфигураций СОТР положительно характеризуют выбор метода оптимизации и разработанный алгоритм.

В табл. 2 показаны список значений тепловыделения Q первого ЭРИ для рассмотренных конфигураций и предложенное алгоритмом оптимального синтеза терморегулирующее средство СОТР. В качестве примера представлен один из ЭРИ, так как для остальных шести ЭРИ результаты оптимизации схожи.

Таблица 2 Средства СОТР для 1-го ЭРИ по результатам оптимального синтеза

№ конфи- гурации (<i>i</i>)	$Q_{i,1}$, Bt	Предложенное средство СОТР	Значения параметров средства СОТР	Полное тепловое сопротивление R , K/BT	Температура ЭРИ <i>T</i> , °C
1	2	Радиатор	$D_l = 29 \text{ MM}, H_r = 24 \text{ MM}, N_r = 5, D_{elr} = 3 \text{ MM}, D_{elp} = 3 \text{ MM}$	10,91	90,16
2	4	Радиатор	$D_l = 41 \text{ MM}, H_r = 35 \text{ MM}, N_r = 6, D_{elr} = 3 \text{ MM}, D_{elp} = 4 \text{ MM}$	6,22	91,53
3	6	Тепловая труба	$d = 4.5 \text{ MM}, w = 1 \text{ MM}, Q_{\text{max}} = 7.18 \text{ BT}$	0,003	44,32
4	8	Тепловая труба	$d = 5 \text{ MM}, w = 1 \text{ MM}, Q_{\text{max}} = 9,67 \text{ BT}$	0,003	45,02
5	10	Тепловая труба	$d = 5.5 \text{ MM}, w = 1 \text{ MM}, Q_{\text{max}} = 12.1 \text{ BT}$	0,002	45,61

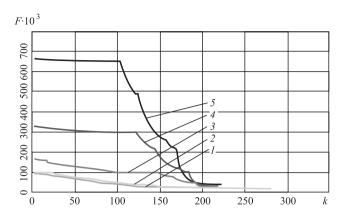


Рис. 4. Вид зависимости целевой функции от шага оптимизации СОТР блока РЭА при различных начальных конфигурациях

Как видно из табл. 2, для ЭРИ при тепловыделении менее 6 Вт алгоритмом оптимального синтеза предложены пластинчатые радиаторы — менее затратное средство терморегулирования, при этом требования по поддержанию температуры на ЭРИ в заданном диапазоне 0...100 °C выполняются.

Для более теплонагруженных ЭРИ, начиная с 6 Вт, алгоритмом предложены более дорогостоящие ТТ, но позволяющие отвести тепло с минимальным тепловым сопротивлением. При этом диаметр ТТ соответствует $Q_{i, 1}$ и обеспечивает теплопередачу до Q_{\max} Вт, которое в данном случае лимитируется капиллярным ограничением фитиля по кипению теплоносителя. Толщина фитиля не превышает 1 мм для

всех случаев, что является следствием задания относительно большого коэффициента при отношении w/w_{\min} стоимостной функции ТТ (см. табл. 1). При некритичном варьировании этого параметра весовые коэффициенты можно перераспределить другим образом.

Выводы. Разработан метод автоматизированного структурного и параметрического синтеза средств обеспечения тепловых режимов РЭА. Представлен критерий оптимального проектирования, позволяющий оценить эффективность систем обеспечения тепловых режимов РЭА с учётом экспертно-ценовых показателей стоимости. Разработан и реализован алгоритм синтеза, а также получены практические результаты, позволяющие подтвердить эффективность метода.

Библиографические ссылки

- 1. **Sidy Ndao, Yoav Peles, Michael K. Jensen.** Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies // International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009). P. 4317—4326.
- 2. **Jaluria Yogesh.** Design and optimization of thermal systems. 2nd ed. Boca, Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 752 p.
- 3. **Кожевников А.М.** Методы оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов: дис. ... д-ра техн. наук. МИЭМ, 2005. 150 с.
- 4. **Банди В.** Методы оптимизации. Вводный курс: [Пер. с англ.]. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.

Уважаемые читатели!

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

Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 62.9+621.01/.03+621.37/.39

Е.Н. Ивашов, д-р техн. наук, проф., **Н.П. Кравченко,** канд. техн. наук, доц., **К.Д. Федотов, В.О. Яговцев**

(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики")

eivashov@hse.ru

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ ДЛЯ УСТРОЙСТВ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Предложены алгоритмы автоматизированного выполнения отдельных проектных работ, в том числе приведён алгоритм TOPSIS. Представлено устройство перемещений для нанотехнологии.

Ключевые слова: автоматизация проектных работ; устройства перемещений для нанотехнологий.

The automatic implementation algorithms of individual project activities including TOPSIS algorithm are proposed. The displacement device for nanotechnology is represented.

Keywords: design activities automation; displacement devices for nanotechnology.

Значительная часть задач принятия решений имеет множество целевых функций, которые не могут быть оптимизированы одновременно вследствие присущей им несоразмерности и конфликта между этими целями. Поэтому основной целью становится получение "лучшего компромиссного" многоцелевого решения (multiple objectives decision making). Для этого было предложено большое количество методологий.

Математически задачу многоцелевого принятия решений (МЦПР) можно представить в виде:

$$\max/\min[f_1(x), f_2(x), ..., f_k(x)],$$
 (1)

где $x \in X = \{x | g_h(x) \} >, =, < \}0, h = 1, 2, ..., r\};$ $f_j(x)$: цель (выгода) для максимизации, $j \in J$; $f_i(x)$: цель (цена) для минимизации, $i \in I$.

Задача включает в себя n переменных, m условий и k целей. Функции $f_i(x)$, $f_j(x)$, $g_h(x) \forall i, j, h$ могут быть как линейными, так и нелинейными. Для решения формулы (1) был разработан новый подход — метод упорядоченного предпочтения через сходство с идеальным решением для задач МЦПР (method of ordered preference through likeness with ideal decision — TOPSIS).

Принцип компромисса для TOPSIS состоит в том, что выбранная альтернатива должна иметь "наикратчайшее расстояние до позитивного идеального решения" (PIS) и "наибольшее расстояние до негативного идеального решения" (NIS).

Для того чтобы математически сформулировать принцип компромисса, сначала определим контрольные точки *PIS* и *NIS* как:

$$f_{t}^{*} = \max_{x \in X} f_{j}(x) \forall j \in J = \min_{x \in X} f_{i}(x) \forall i \in I; (2)$$

$$f_{t}^{*} = \min_{x \in X} f_{j}(x) \forall j \in J = \max_{x \in X} f_{i}(x) \forall i \in I, (3)$$

где
$$t = 1, 2, ..., k$$
.

Пусть $f^* = \left\{f_1^*, f_2^*, ..., f_k^*\right\}$ является вектором решения формулы (2). Этот вектор состоит из индивидуальных наилучших возможных решений для всех целей и называется *PIS*. Подобно ему, $f = \left\{f_1^*, f_2^*, ..., f_k^*\right\}$ является вектором решения формулы (3) и состоит из наихудших возможных решений для всех целей (*NIS*). Заметим, что f^* и f всегда находятся в пределах допустимой области значений формулы (1).

Кроме PIS и NIS, для измерения расстояния от PIS и NIS используется L_p метрика Миньковского. Из-за несоразмерности между целями необходимо сначала нормализовать компонентное расстояние (от PIS и NIS) для каждой цели. Получаем следующие функции расстояния:

$$d_{p}^{PIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_{j}^{p} \left[\frac{f_{j}^{*} - f_{j}(x)}{f_{j}^{*} - f_{j}^{-}} \right]^{p} + \sum_{i \in I} w_{i}^{p} \left[\frac{f_{i}(x) - f_{i}^{*}}{f_{i}^{-} - f_{i}^{*}} \right]^{p} \right\}^{1/p};$$

$$(4)$$

$$d_{p}^{NIS} = \left\{ \sum_{j \in J} w_{j}^{p} \left[\frac{f_{j}(x) - f_{j}^{-}}{f_{j}^{*} - f_{j}^{-}} \right]^{p} + \sum_{i \in I} w_{i}^{p} \left[\frac{f_{i}^{-} - f_{i}(x)}{f_{i}^{-} - f_{i}^{*}} \right]^{p} \right\}^{1/p},$$
(5)

где w_t (t=1, 2, ..., k) — относительная важность (веса) целей; $p=1, 2, ..., \infty$ — параметр функций расстояния; d_p^{PIS} (уступки) и d_p^{NIS} (поощрения) — расстояния до PIS и NIS соответственно.

Подчеркнём, что w_t показывает степень важности t-й цели. В то же время свойство параметра расстояния p таково, что по мере роста p расстояние d_p уменьшается, т.е. $d_1 > d_2 > ... > d_{\infty}$, и в формировании суммарного расстояния упор делается на наибольшее отклонение; p=1 подразумевает равную важность при формировании функции расстояния d_1 для всех индивидуальных отклонений; p=2 подразумевает, что наивысшая важность присваивается наибольшему отклонению пропорционально.

При $p=\infty$ наибольшее отклонение полностью доминирует при определении расстояния; d_1 (расстояние Манхэттена) и d_2 (расстояние Евклида) — наидлиннейшее и наикратчайшее в геометрическом смысле, а d_{∞} (расстояние Чебышева) — наикратчайшее в числовом смысле. Среди всех значений p случаи $p=1, 2, \infty$ важны практически и даже являются хорошо известным стандартом в области теории управления.

Вместо k исходных целей имеем цели "минимизировать расстояние до PIS d_p^{PIS} " и "максимизировать расстояние от NIS d_p^{NIS} ", т.е. двухцелевую задачу программирования:

$$\min d_p^{PIS}(x); \\ \max d_p^{NIS}(x), \tag{6}$$

где $p = 1, 2, \infty$.

В связи с тем, что эти две цели обычно конфликтуют друг с другом, нельзя одновременно достичь их индивидуального оптимума. Каждая цель достигает только части её оптимума, поэтому цели становятся "как можно ближе к *PIS*" и "как можно дальше от *NIS*", т.е. очень нечёткие. Чтобы смоделировать эти нечёткие термины, можно использовать функции принадлежности из теории нечётких множеств для представления степени удовлетворения/

предпочтения обеих целей. В рассмотрении функции принадлежности $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$ — это две невозрастающие/неубывающие монотонные функции между точками экстремума d_p^* и d_p , где:

$$\left(d_{p}^{PIS}\right)^{*} = \min_{x \in X} d_{p}^{PIS}(x),$$
 получаем решение x^{PIS} ; (7)
$$\left(d_{p}^{NIS}\right)^{*} = \max_{x \in X} d_{p}^{NIS}(x),$$

получаем решение
$$x^{NIS}$$
; (8)

$$d_p^{PIS} = d_p^{PIS}(x^{NIS}); (9)$$

$$d_p^{NIS} = d_p^{NIS}(x^{PIS}). (10)$$

Основываясь на концепции предпочтения, назначаем меньшую степень там, где короче расстояние от *PIS* для $\mu_l(x)$, и большую степень там, где длиннее расстояние до *NIS* для $\mu_2(x)$.

Таким образом, $\mu_1(x)$ и $\mu_2(x)$ могут быть получены так, как показано на рис. 1.

PIS можем достичь, решая задачу:

$$\min d_{\infty}^{PIS},$$

$$w_{j} \left[\left(f_{j}^{*} - f_{j}(x) \right) / \left(f_{j}^{*} - f_{j}^{-} \right) \right] \leq d_{\infty}^{PIS}, \forall j;$$

$$w_{i} \left[\left(f_{i} - f_{i}^{*}(x) \right) / \left(f_{i}^{-} - f_{i}^{*} \right) \right] \leq d_{\infty}^{PIS}, \forall j;$$

$$x \in X,$$

$$(11)$$

$$\max_{j} d_{\infty}^{NIS},$$

$$w_{j} \left[\left(f_{j}(x) - f_{j}^{-} \right) / \left(f_{j}^{*} - f_{j}^{-} \right) \right] \ge d_{\infty}^{NIS}, \forall j;$$

$$w_{i} \left[\left(f_{i}^{-} - f_{i}(x) \right) / \left(f_{i}^{-} - f_{i}^{*} \right) \right] \ge d_{\infty}^{NIS}, \forall i;$$

$$x \in X.$$

$$(12)$$

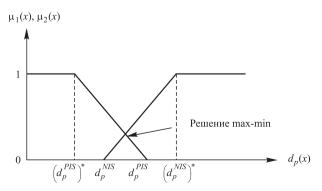


Рис. 1. Функции принадлежности

Подобно этому можно получить NIS при тех же ограничениях в формулах (11) и (12) соответственно.

Как известно, формула (12) эквивалентна следующей:

$$\min d_{\infty}^{NIS},$$

$$w_{j} \left[\left(f_{j}^{*} - f_{j}(x) \right) / \left(f_{j}^{*} - f_{j}^{-} \right) \right] \leq w_{j} - d_{\infty}^{NIS}, \forall j;$$

$$w_{i} \left[\left(f_{i}(x) - f_{i}^{*} \right) / \left(f_{i}^{-} - f_{i}^{*} \right) \right] \leq w_{i} - d_{\infty}^{NIS}, \forall i;$$

$$x \in X,$$

$$(13)$$

Если $w_1=w_2=...=w_k=1/k$, то можно положить $d_{\infty}^{PIS}=1/k-d_{\infty}^{NIS}$ и $d_{\infty}^{NIS}=1/k-d_{\infty}^{PIS}$. Формула (13), в свою очередь, эквивалентна следующей:

$$\min d_{\infty}^{PIS} - 1/k,$$

$$w_{j} \left[\left(f_{j}^{*} - f_{j}(x) \right) / \left(f_{j}^{*} - f_{j}^{-} \right) \right] \leq d_{\infty}^{NIS}, \forall j;$$

$$w_{i} \left[\left(f_{i}(x) - f_{i}^{*} \right) / \left(f_{i}^{-} - f_{i}^{*} \right) \right] \leq d_{\infty}^{NIS}, \forall i;$$

$$x \in X,$$

$$(14)$$

которая будет иметь своим решением то же решение, что и формула (11).

Таким образом, формулы (11) и (12) — это по сути одна и та же задача. Процедура компромисса TOPSIS в этом случае не требуется. Другими словами, когда $p=\infty$, компромиссное решение TOPSIS можно получить, решая либо формулу (11), либо формулу (12). Однако, когда $p=\infty$ и веса целей разные, формулы (11) и (12) тоже будут иметь разные решения.

При p=1 имеем $d_1^{PIS}=1-d_1^{NIS}$. Заметим, что $\min d_1^{PIS}$, как и $\max d_1^{NIS}$ ограничены одинаковыми условиями и имеют одинаковое решение, независимо от того, одинаковы веса целей или нет. Таким образом, компромиссное решение TOPSIS можно получить, либо минимизируя d_1^{PIS} , либо максимизируя d_1^{NIS} . Для случая $2 и <math>\max d_1^{NIS}$ обычно имеют различные решения [1].

Алгоритмы автоматизированного выполнения отдельных проектных работ необходимо объединять во взаимосвязанную последовательность, определив при этом информационные и организационные связи этих работ. В качестве одной из возможных схем проектирования электромеханических устройств (ЭМУ) в условиях функционирования САПР предлагается схема, показанная на рис. 2.

После задания требований ТЗ и возможных уступок по ним осуществляется поиск аналогов с использованием сведений из базы данных.

В дальнейшем может быть произведена проработка эскиза конструкции для обеспечения требований ТЗ по ряду показателей, на которые влияют параметры конструкции. В качестве исходных здесь используют конструкции аналогов, описания которых берут из базы данных. Поиск прототипов предусматривает вход в допустимую область по уровню всех рабочих показателей, оговорённому в ТЗ. Для этого изменению подвергаются различные группы параметров аналогов.

Параметрическая оптимизация предполагает дальнейшее улучшение рабочих показателей объекта. При этом могут приниматься во внимание один или несколько критериев оптимальности, а в качестве параметров оптимизации могут рассматриваться как внутренние параметры объекта, так и управляющие воздействия. В случае если параметрическая оптимизация выполняется с применением упрощённых математических моделей объекта проектирования, в дальнейшем необходимо детально проанализировать процессы, определяющее уровень рабо-

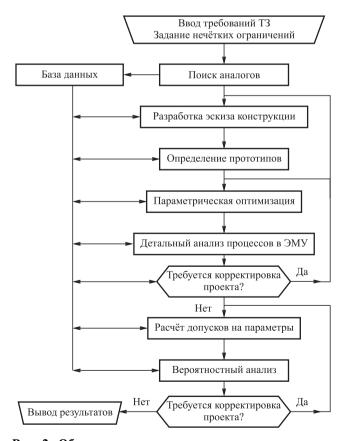


Рис. 2. Общая схема автоматизированного проектирования

чих показателей объекта, в различных режимах. Для этих целей используется наиболее точная математическая модель ЭМУ.

Проверка рабочих свойств проектируемого объекта может выявить ряд неточностей в ранее принятых проектных решениях. В таком случае требуется скорректировать эти решения, внеся необходимые изменения в конструкцию ЭМУ или задав новые данные для параметрической оптимизации.

На следующих этапах осуществляется расчёт допусков на параметры проектируемого ЭМУ и вероятностный анализ с учётом технологических и эксплуатационных факторов. Изменяя эти факторы в различных сочетаниях, имитируют реальные процессы испытаний продукции. Если результаты вероятностного анализа окажутся негативными, необходимо скорректировать ранее определённые допуски на параметры и повторить процедуру вероятностного анализа.

На заключительном шаге проектирования выпускается комплект документации, необходимой для последующего производства и эксплуатации объекта.

Таким образом, в рассмотренном случае сохраняется последовательность работ, характерная и для неавтоматизированного проектирования. Необходимо отметить, что при внешнем сходстве процедур автоматизированное проектирование позволяет существенно расширить круг решаемых задач, повысить достоверность и оперативность получения результатов. Кроме того, проектирование становится итерационным и многовариантным благодаря повышению производительности труда проектировщиков, а также более качественному информационному обеспечению разработок.

Строгая постановка и решение задач параметрической оптимизации, расчёт допусков на параметры, вероятностный анализ ЭМУ стали возможны лишь благодаря применению ЭВМ. При этом проектировщики могут одновременно прорабатывать несколько вариантов проекта без ощутимого увеличения затрачиваемого времени.

Наиболее важным моментом формирования общей схемы автоматизированного проектирования является организация информационных связей между отдельными его этапами. Эти связи реализуются посредством единой базы данных, в которой помимо описаний известных объектов и разнообразной справочной информации содержится описание проектируемого объекта. В процессе проектирования

это описание (знаковая модель) развивается и уточняется.

Выбрать первую такую модель (или несколько моделей), характеризуемую наборами данных, определяющих значения параметров и показателей, а также эскизы конструкций, можно, как правило, на основе аналогов. Разработка предварительного эскиза конструкции позволяет уточнить эту модель. В процессе параметрической оптимизации модель развивается в результате определения геометрических размеров, обмоточных данных, электротехнических и магнитных материалов проектируемого объекта. Детальный анализ физических процессов, протекающих в объекте, может потребовать изменения его параметров. Эти изменения должны быть внесены в знаковую модель.

Допуски, рассчитанные на основе значений параметров, определённых на этапе параметрической оптимизации и уточнённых при детальном вероятностном анализе, служат дальнейшему развитию ранее полученного описания объекта.

Окончательная знаковая модель представляет собой полностью определённое описание проектируемого объекта, включающее значения всех параметров и допусков на параметры, т.е. данные, необходимые для начала подготовки производства.

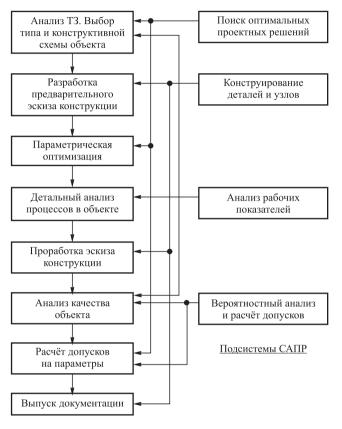
Выполнение проектных работ на каждом из этапов заканчивается передачей полученного описания объекта в базу данных. На последующих этапах основная часть данных, необходимых для проектирования, выбирается из этой базы данных. Дополнительная информация должна быть введена в ЭВМ проектировщиками.

Поскольку проектирование является коллективным трудом, посредством базы данных ведётся обмен данными не только между программами, но и между отдельными проектировщиками. По этой причине база данных выполняет также организационные функции, определяя не только содержание, но и форму информационного обмена.

Получение промежуточных или окончательных проектных решений на взаимосвязанных этапах автоматизированного проектирования является задачей объектных подсистем САПР.

На различных этапах проектирования возникает ряд однотипных проблем, таких как поиск оптимальных проектных решений, конструирование, анализ физических процессов в объекте, вероятностный анализ, расчёт до-

пусков на параметры. Целесообразно однотипные действия выполнять с помощью одной объектной подсистемы на разных этапах проектирования или применять компоненты



Этапы проектирования

Рис. 3. Сферы действия объектных подсистем САПР

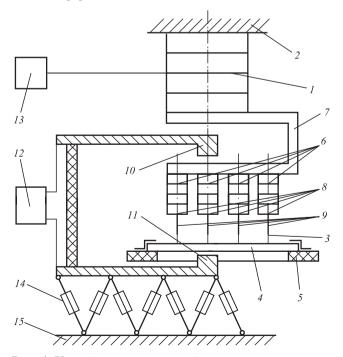


Рис. 4. Устройство перемещений для нанотехнологии

разных подсистем на одном этапе. Разделение сфер действия объектных подсистем САПР гироскопических электродвигателей показано на рис. 3 и отражает их основные функции.

Устройство перемещений для нанотехнологии (рис. 4) содержит пьезопривод 1, установленный на неподвижной платформе 2, с зондовым устройством 3, подложку 4 с подложкодержателем 5, отличающееся тем, что устройство снабжено дополнительными пьезоприводами 6, связанными с основным пьезоприводом посредством кронштейна 7. На свободных торцах 8 дополнительных пьезоприводов закреплено зондовое устройство, выполненное в виде зондов 9, внутри кронштейна и под подложкодержателем расположены клеммы 10, 11 устройства дополнительного источника напряжений 12, не связанного с основным источником напряжения 13, причём кронштейн закреплён на однокоординатном приводе 14, который связан с неподвижным основанием 15.

Устройство перемещений для нанотехнологии (см. рис. 4) работает следующим образом.

При подаче напряжения от основного источника напряжения пьезопривод, закреплённый на неподвижной платформе, вследствие обратного пьезоэффекта удлиняется, перемещая зондовое устройство к подложке посредством перемещений пары клемм с помощью однокоординатного привода при подаче напряжения от дополнительного источника напряжения. Пьезоприводы деформируются индивидуально, подводя зонды, закреплённые на свободных торцах к подложке, закреплённой на подложкодержателе, и выполняется технологический процесс.

Применение предложенного устройства перемещений для нанотехнологии позволяет выполнять технологический процесс в нескольких областях подложки с заданной степенью точности [2].

Библиографические ссылки

- 1. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решений при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. СПб.: Инфо-да. 2004. 223 с.
- 2. **Ивашов Е.Н., Федотов К.Д.** Подсистема автоматизированного проектирования элементов пьезоэлектрических устройств // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 30—36.

УДК 536.532

Г.Я. Хусаинова, канд. физ.-мат. наук, доц. (Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

gkama@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ АНОМАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Рассмотрена стационарная фильтрация аномальной жидкости для плоскорадиального течения. Получены аналитические решения распределения температуры в призабойной зоне при эксплуатации добывающей и нагнетающей скважины. Исследовано влияние начального градиента давления на температурные поля при разных градиентах давления и дебитах.

Ключевые слова: фильтрация; аномальная жидкость; начальный градиент давления; давление; температурные поля.

The stationary filtering the abnormal fluid for plane-radial flow is considered. The analytical solution of the temperature distribution near the wellbore during operation of the extracting and pressurizing wells is received. The effect of the initial pressure gradient on the temperature fields at different pressure gradients and flow rates is studied.

Keywords: filtration; abnormal fluid; the initial pressure gradient; pressure; temperature fields.

Введение. При контроле и управлении современными технологическими процессами возникает необходимость моделирования движения структурированной многокомпонентной жидкости. Повышение эффективности разработки и эксплуатации нефтяных и нефтегазовых месторождений связано с расширением и углублением представлений о свойствах таких систем, особенностях их фильтрации в продуктивных пластах, с изучением физикохимических процессов, сопровождающих движение нефтяных и нефтегазовых систем в пористых средах. Наличие начального градиента давления при фильтрации нефти существенно влияет на поля давления, температуры и, наконец, на нефтегазоотдачу [1, 2].

В условиях реальных пластовых систем установление поля давления происходит значительно быстрее, чем температурного поля. Это означает, что при изучении температурных процессов в некоторых случаях поле давления можно считать стационарным. Термодинамические процессы при течении жидкостей в пористой среде в нестационарном поле давления отличаются от стационарных рядом важных особенностей. Поэтому явление изменения температуры при фильтрации жидкостей в пористой среде называется баротермическим эффектом [3].

Отметим, что установление температуры фильтрующейся жидкости сразу после включения стационарного профиля давления также

относится к баротермическому эффекту и не совпадает с эффектом Джоуля—Томсона.

Величина эффекта Джоуля—Томсона не зависит от характеристик пористой среды, а определяется свойствами жидкости. Величина баротермического эффекта определяется коллекторскими свойствами пористой среды, изменяется со временем, зависит от распределения давления по пути движения жидкости.

Рассмотрим подробно поля температуры при плоскорадиальном течении аномальной жидкости [4].

Основная часть. Пусть в момент времени t=0 в горизонтальном пласте, который заполнен нефтью, обладающей предельным градиентом сдвига, пущена в эксплуатацию добывающая скважина. Начальное пластовое давление во всём пласте одинаково и равно P_k . Запишем основные уравнения.

Уравнение энергии [5]:

$$c_{s} \frac{\partial T}{\partial t} - c_{l} m \eta \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| \leq G_{0};$$

$$c_{s} \frac{\partial T}{\partial t} + c_{l} \upsilon \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial r} - \eta G_{0} \frac{\partial P}{\partial r} \middle/ \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| \right) - \quad (1)$$

$$-\eta m c_{l} \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > G_{0},$$

где T — температура пласта; P — давление жидкости в пласте; υ — скорость фильтрации жид-

кости; c_s и c_l — теплоёмкость скелета и жидкости соответственно; η — коэффициет адиабатического охлаждения; ε — коэффициент Джоуля—Томсона, m — коэффициет пористости; λ — коэффициент теплопроводности; G_0 — начальный (предельный) градиент давления;

с начальным

$$T|_{t=0} = 0 \tag{2}$$

и граничным условиями:

$$T\big|_{r=R_{k}}=T_{0}(t). \tag{3}$$

Распределение давления с учётом начального градиента давления

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left[\frac{\partial P}{\partial r} - G_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial r}}{\left| \frac{\partial P}{\partial r} \right|} \right] \right) \text{при } \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > G_0 (4)$$

с начальным

$$P|_{t=0} = P_k \tag{5}$$

и граничными условиями:

$$P(R_k) = P_k,$$

$$\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} - G_0 \right)_{\mid r = r_0} = \frac{Q}{2\pi r_0 h},$$
(6)

где k — коэффициент проницаемости; μ — вязкость жидкости; χ — коэффициент пьезопроводности; Q — объёмный расход жидкости; h и r_0 — толщина пласта и радиус скважины.

При стационарной плоскорадиальной фильтрации распределение давления имеет вид [6]:

$$P(r) = P_k - G_0(R_k - r) + \frac{\mu Q}{2\pi kh} \ln \frac{r}{R_k}, \quad (7)$$

где R_k — радиус контура.

При отборе жидкости из пласта давление на контуре больше, чем на скважине.

Скорость переноса тепла u и линеаризованное уравнение состояния можно написать в виде:

$$u = -\frac{c_l}{c_s} \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} - G_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial r}}{\left| \frac{\partial P}{\partial r} \right|} \right) \text{при } \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > G_0, \quad (8)$$

Рассмотрим случай, когда пренебрегаем теплопроводностью. После подстановки (7), (8) в уравнение энергии получим

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{2\pi h r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{c_s} \frac{Q \Gamma}{2\pi h r} \left(G_0 + \frac{Q \Gamma}{2\pi h r k} \right) + \frac{c_l}{c_s} \frac{Q \Gamma}{2\pi h r} \frac{\partial P}{\partial r} = 0. \tag{10}$$

Уравнение (10) решим методом характеристик. Найдём характеристики из уравнения

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{2\pi h r},\tag{11}$$

тогда

$$r^{2} = R_{k}^{2} - \frac{c_{l}}{c_{s}} \frac{Q}{\pi h} (t - p), \qquad (12)$$

где р — параметрическое значение.

Вычислим распределение температуры из уравнения (10)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{c_l}{c_s} \frac{QG_0}{2\pi hr} (\varepsilon - \eta) + \frac{c_l}{c_s} \frac{\mu \varepsilon Q^2}{(2\pi hr)^2 k}.$$
 (13)

С учётом (12), начального и граничного условий находим окончательное распределение полей температуры для добывающей скважины при аксиально-симметричном течении:

$$T = G_0(\varepsilon - \eta) \left(\sqrt{r^2 + \frac{c_I}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t} - r \right) + \frac{\varepsilon \mu}{4 \pi k h} \ln \left| \frac{r^2 + \frac{c_I}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t}{r^2} \right|$$
(14)

при
$$r^2 < R_k^2 - \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t;$$

$$T = T_0 \left\{ t + \frac{c_s}{c_l} \frac{(r^2 - R_k^2)\pi h}{Q} \right\} - G_0(\varepsilon - \eta)(r - R_k) + \frac{\varepsilon \mu}{k} \frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{R_k}{r}$$
при $r^2 > R_k^2 - \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t.$ (15)

Выражения (14)—(15) описывают распределение температуры в призабойной зоне при эксплуатации добывающей скважины.

На рис. 1 представлены графики зависимости температуры от расстояния при различных G_0 . Расчёты проводили при следующих значениях параметров пласта и жидкости [7, 8]: $c_l = 500 \text{ Kkan/K·m}^3$, $c_s = 700 \text{ Kkan/K·m}^3$, $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-7} \text{ K/\Pia}, \ \mu = 0.01 \ \text{\Pia} \cdot \text{c}, \ k = 5 \cdot 10^{-12} \ \text{m}^2,$ $\eta = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ K/Па}, Q = 10 \text{ м}^3/\text{сут}$. Из графиков видно, что при фильтрации аномальной жидкости температура увеличивается на большее значение, чем при фильтрации ньютоновской жидкости.

На рис. 2 показаны графики зависимости температуры от расстояния в различные моменты времени при различных градиентах давления. Кривые 1, 2 показывают увеличение температуры за t = 33 мин и t = 66 мин при фильтрации ньютоновской жидкости $(G_0 = 0 \text{ Па/м})$, кривые 3, 4 — вязкопластичной жидкости $(G_0 = 0.95 \cdot 10^5 \text{ Па/м})$ в эти же моменты времени.

На рис. 3 представлены графики зависимости относительного прироста температуры

$$ilde{T} = rac{T(G_0
eq 0) - T(G_0 = 0)}{T(G_0
eq 0)}$$
 от дебита \emph{Q} . Из гра-

фиков видно, что при малых дебитах зависимость \tilde{T} от начального градиента сдвига существенна, а с увеличением дебита зависимость температуры от начального градиента давления уменьшается.

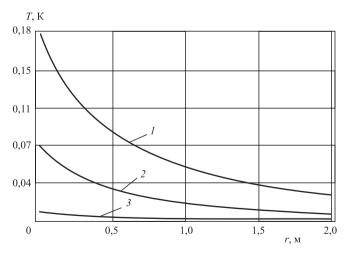


Рис. 1. Зависимости температуры от расстояния при различных начальных градиентах сдвига:

$$I - G_0 = 0.95 \cdot 10^5 \, \text{Ta/m}$$

$$1 - G_0 = 0.95 \cdot 10^5 \,\mathrm{\Pi a/m};$$

 $2 - G_0 = 0.075 \cdot 10^5 \,\mathrm{\Pi a/m};$

$$3 - G_0 = 0$$
 Па/м за $t = 6$ ч

Аналогично, рассмотрим задачу для закачивающей скважины (когда $P_k < P_w$). Тогда $\frac{\partial P}{\partial r}$ < 0. Второе уравнение (1) примет вид:

$$c_{s} \frac{\partial T}{\partial t} + c_{l} \upsilon \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial r} + \eta G_{0} \right) - \eta m c_{l} \frac{\partial P}{\partial t} =$$

$$= \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > G_{0},$$

$$(16)$$

$$T|_{t=0} = 0, T|_{r=r_0} = T_0(t).$$
 (17)

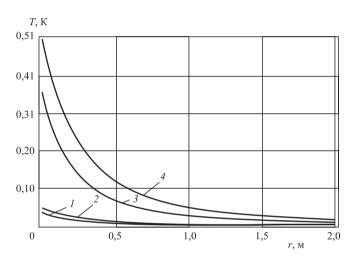


Рис. 2. Зависимости температуры от расстояния в различные моменты времени:

$$1 - G_0 = 0$$
 Па/м, $t = 33$ мин;

$$2 - G_0 = 0$$
 Па/м, $t = 66$ мин;

$$2 - G_0 = 0$$
 Па/м, $t = 66$ мин; $3 - G_0 = 0.95 \cdot 10^5$ Па/м, $t = 33$ мин;

$$4 - G_0 = 0.95 \cdot 10^5 \,\mathrm{Па/м}, t = 66 \,\mathrm{мин}$$

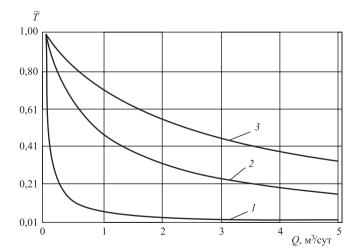


Рис. 3. Зависимости относительного прироста температуры \tilde{T} от дебита Q:

$$I - G_0 = 0.002 \cdot 10^5 \, \text{Ha/m}$$
:

$$I - G_0 = 0.002 \cdot 10^5 \text{ Ta/m};$$

 $2 - G_0 = 0.028 \cdot 10^5 \text{ Ta/m};$
 $3 - G_0 = 0.075 \cdot 10^5 \text{ Ta/m}$

$$3 - G_0 = 0.075 \cdot 10^5 \, \text{Ta/M}$$

Распределение давления находят из уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left[\frac{\partial P}{\partial r} + G_0 \right] \right)$$
 при $\left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > G_0$ (18)

при начальном и граничных условиях:

$$P|_{t=0} = P_{k}, P(r_{0}) = P_{w}, P(R_{k}) = P_{k};$$
(19)
$$-\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} + G_{0} \right)_{r=r_{0}} = \frac{Q}{2\pi r_{0}h}.$$

Тогда распределение давления для закачивающей скважины при стационарной фильтрации имеет вид:

$$P(r) = P_w - G_0(r - r_0) - \frac{\mu Q}{2\pi kh} \ln \frac{r}{r_0}.$$
 (20)

После некоторых преобразований, как в предыдущей задаче, решение рассматриваемой задачи можно представить в виде

$$T = G_0(\varepsilon - \eta) \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t} \right) + \frac{\varepsilon \mu}{k} \frac{Q}{4\pi h} \ln \left| \frac{r^2}{r^2 - \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t} \right|$$
(21)

при
$$r^2 > r_0^2 + \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t;$$

$$T = T_0 \left\{ t - \frac{c_l}{c_s} \frac{(r^2 - r_0^2)\pi h}{Q} \right\} + G_0(\varepsilon - \eta)(r - r_0) + \frac{\varepsilon \mu}{k} \frac{Q}{2\pi h} \ln \frac{r}{r_0}$$
(22)

при
$$r^2 < r_0^2 + \frac{c_l}{c_s} \frac{Q}{\pi h} t$$
.

Таким образом, получены выражения, описывающие распределение температуры для нагнетающей скважины.

Заключение. Получены аналитические решения плоскорадиального фильтрационного течения для добывающей и нагнетающей скважин. Анализ полученных результатов показал, что при одинаковой скорости фильтрации вклад начального градиента давления приводит к дополнительному нагреву пласта. С ростом значения начального градиента давления, а также вязкости величина температурного эффекта увеличивается. При малых дебитах зависимость относительного прироста температуры \tilde{T} , обусловленного аномальными свойствами жидкости, от начального сдвига существенна, с увеличением дебита вклад начального градиента давления в температурное поле уменьшается.

Библиографические ссылки

- 1. Мирзаджанзаде А.Х., Баренблатт Г.И., Ентов В.М. и др. О возможном влиянии начального градиента давления на разработку многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений при водонапорном режиме // Известия вузов. Серия "Нефть и газ". 1970. № 1. С. 39—49.
- 2. **Мирзаджанзаде А.Х., Ковалёв А.П., Зайцев Ю.В.** Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра. 1972, 200 с.
- 3. **Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра. 1972, 288 с.
- 4. **Хусаинова Г.Я.** Исследование температурных полей при фильтрации аномальных жидкостей. / Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 1998. С. 14.
- 5. **Филиппов А.И., Хусаинова Г.Я.** Развитие термодинамики аномальных жидкостей // Материалы II Уральской региональной межвуз. науч.-практич. конф. Уфа. 1997. С. 34.
- 6. Филиппов А.И., Хусаинова Г.Я., Девяткин Е.М. К термодинамике аномальных нефтей в пластах // Известия вузов. Серия "Нефть и газ". 1997. № 2. С. 38—46.
- 7. **Кикоин Й.К.** Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
- 8. **Чертов А.Г.** Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): справ. пособие. М.: Высш. шк., 1990, 335 с.

Ð

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.5.015.3

А.Д. Семёнов, д-р техн. наук, проф., О.В. Авдеева, канд. техн. наук (Пензенский государственный университет), А.С. Никиткин, канд. техн. наук (ПО "Старт" им. М.В. Проценко, г. Заречный Пензенской обл.), sashanikitkin@rambler.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложены алгоритм выбора величины межэлектродного промежутка при электроэрозионной обработке алмазных кругов, основанный на новом методе экстремального регулирования мощности, и алгоритм выбора частоты рабочих импульсов с использованием метода статистических испытаний и триангуляции Делоне. Алгоритмы предназначены для системы управления моделируемым технологическим процессом. Установлено, что наблюдается квазипериодическое расположение алмазов на поверхности алмазного круга, зависящее от концентрации и зернистости алмазного порошка в алмазосодержащем слое.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг; электроэрозионное профилирование; частота рабочих импульсов; экстремальное регулирование; автоматизация.

An algorithm for value selecting of the between electrode space at the EDM processing of diamond wheels, based on a new method of power extreme adjustment, and a selection algorithm of the operating impulse frequency through the use of the statistical tests method and Delaunay triangulation are proposed. The algorithms are intended for the control system of the simulated technological process. It is established that a quasi-periodic diamond arrangement on the diamond wheel surface depending on the concentration and grain size of diamond powder in the diamondiferous layer is observed.

Keywords: diamond grinding wheel; EDM shaping; operating impulse frequency; extreme adjustment; automation.

Процесс электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов на металлических связках довольно подробно изучен, выявлено влияние различных технологических режимов обработки на производительность, точность и качество обрабатываемой поверхности, а также износ электрода-инструмента [1]. Однако ввиду сложности взаимосвязей между режимами процесса профилирования и его технологическими характеристиками рекомендации по выбору параметров рабочих импульсов обосновываются, в первую очередь, практическим опытом и результатами экспериментальных исследований [2].

Обоснованный выбор формы рабочих импульсов особенно важен при профилировании алмазно-абразивного инструмента, так как чрезмерное увеличение энергии рабочих импульсов приводит к тому, что алмазные зёрна заметно разрушаются вследствие графитизации, окисления и возникновения термических микронапряжений [3]. В то же время уменьше-

ние энергии импульсов снижает производительность процесса профилирования. Увеличение производительности процесса за счёт уменьшения межэлектродного промежутка недопустимо, так как это может привести к механическому воздействию алмазных зёрен шлифовального круга на электрод-инструмент, в результате чего интенсивно изнашивается формообразующая поверхность. Обоснованный выбор длительности и частоты рабочих импульсов обеспечивает равномерное размещение эрозионных лунок в промежутке между алмазными зёрнами. Такое размещение значительно снижает термическое воздействие разрядных импульсов на алмазные зерна и, как следствие, обеспечивает неизменность их режущих свойств.

Таким образом, рациональный выбор величины межэлектродного промежутка и параметров рабочих импульсов приводит к повышению размерной стойкости фасонных алмазных шлифовальных кругов, а также сохраняет их режущие свойства.

Оптимальная величина межэлектродного промежутка характеризуется максимальной производительностью обработки алмазно-абразивного инструмента и минимальным износом формообразующей части фасонного электрода.

В результате экспериментальных исследований установлено, что при электроэрозионном профилировании алмазных шлифовальных кругов наибольшая производительность процесса достигается, когда электрическая мощность, выделяемая в межэлектродном промежутке, максимальна [4].

Таким образом, для достижения максимальной производительности необходимо поддержание максимального значения электрической мощности, выделяемой в межэлектродном промежутке, автоматическим регулированием величины этого промежутка с помощью экстремального регулятора.

В связи со специфическими особенностями электроэрозионной обработки разработан помехозащищённый алгоритм работы экстремального регулятора с высоким быстродействием, который основан на рекуррентном алгоритме поиска экстремума статической характеристики инерционного объекта [5], заключающегося в поиске экстремального значения регулируемого параметра путём нахождения нуля коэффициента передачи объекта.

Значение коэффициента передачи и его знак можно определить, используя рекуррентную процедуру метода наименьших квадратов (РМНК).

Алгоритм РМНК может быть представлен в виде [6]:

$$\begin{cases} \widehat{\Theta}(k+1) = \widehat{\Theta}(k) + \gamma(k)e(k+1); \\ \gamma(k) = \mu(k+1)P(k)\varphi(k+1); \\ e(k+1) = \gamma(k+1)\psi^{T}(k+1)\widehat{\Theta}(k), \end{cases}$$

где $\widehat{\Theta}(k+1) = [a_1, ..., a_n, b_1, ..., b_m]$ — вектор параметров модели; $\psi^T = [-\gamma(k-1)...-\gamma(k-n), u(k-d-1)...$...u(k-d-m)] — вектор данных.

В свою очередь,

$$\mu(k+1) = \frac{1}{1 + \psi^{T}(k+1)P(k)\psi(k+1)}$$

вектор коррекции;
$$P(k) = \frac{1}{\left[\psi^{T}(k) \psi(k)\right]} -$$

$$P(k+1) = \left[I - \gamma(k) \, \psi^T(k+1)\right] P(k) \quad -$$

весовая матрица, рассчитанная на следующем

$$\varphi(k+1) = \psi(k+1); \widehat{\Theta}(0) = 0; P(0) = \alpha I$$
 — начальные значения переменных.

Коэффициент передачи объекта k_0 вычисляется на основании теоремы о конечном значении дискретной передаточной функции:

$$k_{0} = \lim_{z \to 1} \frac{b_{0} + b_{1}z^{-1} + \dots + b_{m}z^{m}}{1 + \alpha_{1}z^{-1} + \dots + \alpha_{n}z^{n}} = \frac{\sum_{j=0}^{m} b_{j}(k)}{\sum_{i=0}^{n} \alpha_{i}(k)},$$

где α_i — коэффициент авторегрессии; b_i — коэффициент скользящего среднего; z — оператор.

Данный алгоритм реализован в среде имитационного моделирования Simulink. Рассмотрим Simulink-модель, состояшую из экстремального объекта, включающего в себя звено с экстремальной характеристикой и три последовательно соединённых апериодических звена. Схема модели приведена на рис. 1.

График экстремальной характеристики (кривая 1) представлен на рис. 2.

В первом приближении коэффициент передачи нелинейного звена будет равен производной от его статической характеристики (кривая 2) на рис. 2. При изменении входного сигнала нелинейного звена $z_{\text{отн}}$, изменяется и его коэффициент передачи, как это видно на рис. 2.

На рис. 3, $a-\epsilon$ показаны осциллограммы входного, выходного сигналов объекта и его коэффициенты передачи. Помеха имитировалась подачей на вход случайного сигнала,

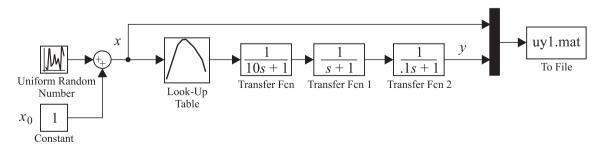


Рис. 1. Simulink-модель объекта с экстремальной характеристикой

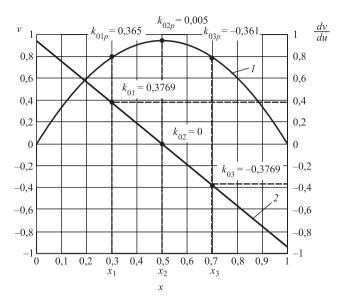


Рис. 2. График экстремальной характеристики

уровень которого соизмерим с уровнем входного сигнала x_0 .

Таким образом, использование разработанного рекуррентного алгоритма вычисления коэффициента передачи объекта позволяет получить достаточно точную оценку коэффициента передачи даже при наличии сильных возмущений, а его значение — уверенно определить положение экстремума.

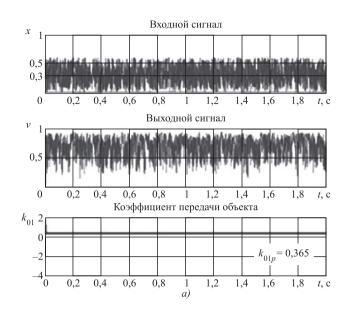
В работе [3] установлено, что максимальный эффект эрозии при обработке алмазосодержащего слоя будет достигнут тогда, когда электрические параметры разряда позволят обеспечить на поверхности слоя лунки с диаметрами, не превышающими среднеквадратичного расстояния между алмазными зёрнами:

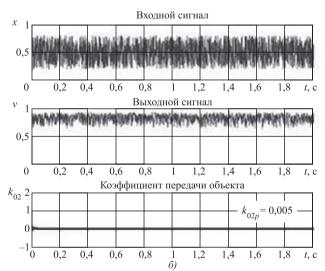
$$d_{\pi} \leq l_{3}$$

где $d_{\scriptscriptstyle \rm J}$ — номинальный диаметр лунки, соответствующий разряду на рабочей поверхности шлифовального круга; $l_{\scriptscriptstyle 3}$ — среднее геометрическое расстояние между зёрнами (шаг зёрен).

Таким образом, для установления обоснованных параметров рабочих импульсов необходимо определить структуру геометрии рабочей поверхности алмазного шлифовального круга и среднее геометрическое расстояние между алмазными зёрнами у шлифовальных кругов определённой зернистости при разнообразной концентрации алмазного порошка в связке.

Для выявления геометрии рабочей поверхности проведено её сканирование профилографом-профилометром в плоскости, прохо-





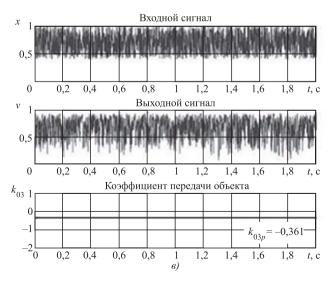
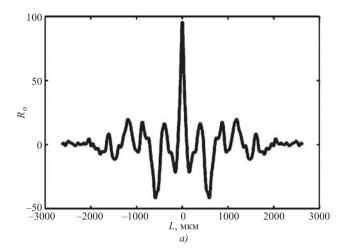


Рис. 3. Осциллограммы входных, выходных сигналов и коэффициентов k_0 :

 $a, \, \delta, \, s$ — рабочие точки до экстремума, в области экстремума, после экстремума соответственно



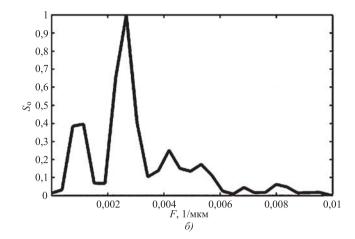


Рис. 4. Корреляционная функция (a) и спектральная плотность (б) профилограммы рабочей поверхности алмазного круга 100%-ной концентрации и зернистостью 50/40 мкм

дящей через ось алмазного круга и перпендикулярной вектору скорости резания.

На рис. 4 приведены корреляционная функция (рис. 4, a) и спектральная плотность (рис. 4, δ) профилограммы рабочей поверхности алмазного круга 100%-ной концентрации и зернистостью 50/40 мкм.

Анализ коррелограмм и спектрограмм позволил установить, что неровности рабочей поверхности алмазных кругов содержат квазипериодическую составляющую, период которой зависит от концентрации и зернистости алмазного порошка. Для рассматриваемого алмазного круга со 100%-ной концентрацией и зернистостью 50/40 мкм период равен 385 мкм.

На основании этого было сделано предположение, что наличие квазипериодической составляющей обусловлено наличием алмазных зёрен, выступающих над поверхностью связки.

Для экспериментальной проверки этого предположения проведено фотографирование различных участков рабочей поверхности алмазного круга.

Рис. 5. Фотография рабочей поверхности алмазного шлифовального круга

Так как рабочая поверхность алмазных кругов является случайной функцией, удовлетворяющей условиям стационарности и эргодичности [7], то нет необходимости рассматривать её целиком. Достаточно определить средний шаг алмазных зёрен на локальном участке этой поверхности. Полученное значение среднего расстояния между алмазными зёрнами будет справедливо для всей рабочей поверхности шлифовального круга.

На рис. 5 представлена фотография фрагмента рабочей поверхности алмазного шлифовального круга зернистостью 50/40 мкм и 100%-ной концентрацией с размерами 640 × 1840 мкм. Фотография получена с помощью микроскопа марки "Альтами СМП1" фирмы ООО "Альта" (г. С.-Петербург). На фотографии отмечены порядковые номера алмазных зёрен и расстояния между ними.

Число зёрен и расстояние между ними, показанное на рис. 5, подтверждает обоснованность сделанного предположения.

Для уточнения расстояния между алмазными зёрнами проведён вычислительный экс-

перимент, в соответствии с которым на рассматриваемом участке поверхности размером 640×1840 мкм, равным размерам фотографии (см. рис. 5) по равномерному закону распределения, размещались n точек, число которых равно числу алмазов, видимых на рис. 5 (n=14). Затем с помощью программного пакета Matlab строилась триангуляция Делоне и определялись длины векторов, образующих треугольники

(рис. 6). После этого вычислялось среднее геометрическое значение длины этих векторов, которое и является средним расстоянием между алмазными зёрнами (шагом зёрен).

Среднее геометрическое значение расстояния между алмазными зёрнами l_3 для шлифовального круга зернистостью 50/40 мкм и концентрацией 100 % получилось равным 410 мкм.

Таким образом, установлено, что наблюдается квазипериодическое расположение алмазов на поверхности алмазного круга, зависящее от концентрации и зернистости алмазного порошка в алмазосодержащем слое.

Рассмотрим локальный участок рабочей поверхности алмазного круга шириной и длиной, равными 640×1840 мкм. Для расчёта количества алмазных зёрен, находящихся на этом участке, примем его глубину, равной половине среднего диаметра алмазного зерна $h=d_{\rm cp}/2$. Выбор такой глубины обусловлен тем, что алмазные зёрна, погружённые в связку на глубину, меньше половины их диаметра, можно не учитывать, так как они из-за слабого сцепления со связкой не смогут участвовать в процессе шлифования. Так, для зернистости 50/40 мкм глубина объёмного локального участка будет равна 35 мкм.

Средний диаметр алмазных зёрен можно записать в виде [8]:

$$d_{\rm cp} = \frac{6,1}{\sqrt[3]{N}},\tag{1}$$

где N — количество абразивных частиц в навеске.

Рассчитаем количество алмазных зёрен, находящихся в объёме рассматриваемого участка:

$$n = k_p \frac{V_{yy}V_a}{V_{ky6}},$$

где $V_{\rm yq}$ — объём рассматриваемого участка; $V_{\rm a}$ — относительный объём, занимаемый алмазами в алмазосодержащем слое [3]; k_p — поправочный коэффициент, учитывающий, что при толщине слоя, равной $h=d_{\rm cp}/2$, относительный объём алмазов в алмазосодержащем слое будет меньше $V_{\rm a}$; $V_{\rm ky6}$ — объём куба, в который вписано алмазное зерно.

Диаметр зерна рассчитывается по формуле 1. Для определения численного значения k_p рассмотрим возможные расположения алмазного зерна диаметром $d_{\rm cp}$ в алмазосодержащем слое толщиной $h=d_{\rm cp}/2$ (рис. 7).

Положение I алмазного зерна соответствует минимальной глубине погружения, равной $d_{\rm cp}/2$. При меньшей глубине погружения зер-

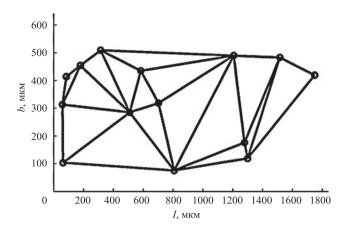


Рис. 6. Триангуляция Делоне для алмазных зёрен, расположенных на рассматриваемом участке

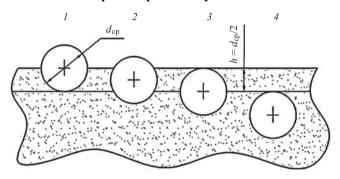


Рис. 7. Возможное расположение алмазных зёрен в связке

но в процессе шлифования не будет удерживаться в связке и под действием механических усилий (при шлифовании) отделится от неё. Положение 2 зерна соответствует погружению в связку на $3d_{\rm cp}/4$, т.е. когда объём зерна, погружённый в выделенный слой связки, будет максимальным. Положение 3 соответствует полному погружению зерна в связку, а положение 4 — когда зерно полностью выходит из заданного слоя (h).

Зависимость относительного объёма зерна, находящегося в слое, равном h от относительной глубины погружения, запишется в виде

$$V_0 = \begin{cases} x_0^2(3-2x_0) & \text{при } 0 \leq x_0 \leq 0, 5-\text{объём} \\ \text{шарового сегмента, от положения } 3 \text{ до } 4; \\ 4,5x_0-3x_0^2-1 & \text{при } 0,5 \leq x_0 \leq 1-\text{объём} \\ \text{шарового слоя, от положения } 1 \text{ до } 2, \end{cases}$$

где $V_0=V_c/V_3$ — относительный объём, приведённый к полному объёму зерна; V_c — объём связки алмазного круга; V_3 — объём зерен алмазного круга; $x_0=\frac{x_c}{r_{\rm cp}}$ — относительная глубина погружения, приведённая к радиусу зерна.

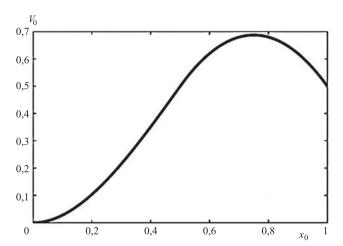


Рис. 8. Зависимость относительного объёма зерна в слое от относительной глубины погружения

Эта зависимость показана на рис. 8.

Среднее значение поправочного коэффициента k_p :

$$k_p = \int_0^{0.5} x_0^2 (3 - 2x_0) dx_0 + \int_{0.5}^1 (4.5x_0 - 3x_0^2 - 1) dx_0 =$$

= $\frac{13}{32} \approx 0.4063$.

Таким образом, формула для определения количества алмазных зёрен, находящихся в объёме рассматриваемого участка, принимает вид:

$$n = k_p \frac{blV_a}{2d_{\rm cp}^2},$$

где b и l — ширина и длина рассматриваемого участка.

По этой формуле проведён расчёт количества алмазных зёрен на участке поверхности 640×1840 мкм шлифовального круга зернистостью 50/40 мкм и концентрацией 100 %. Расчётное число алмазов совпало с экспериментальными данными (n=14).

В результате разработан алгоритм расчёта частоты импульсов напряжения формируемых генератором по характеристикам алмазных шлифовальных кругов, который заключается в следующем.

Рассчитывается количество алмазных зёрен, приходящихся на единицу площади рабочей поверхности алмазного круга:

$$n = \frac{k_p V_a}{2d_{\rm cp}^2}.$$

Исходя из заданной меры надёжности, задаётся число алмазных зёрен и вычисляется

площадь участка рабочей поверхности алмазного круга, на котором случайным образом по равномерному закону распределения размещаются эти зёрна.

Строится триангуляция Делоне и вычисляется среднее геометрическое расстояние между алмазными зёрнами.

Зная среднее геометрическое расстояние между алмазными зёрнами, можно вычислить нижнюю границу частоты рабочих импульсов f_{Γ} при электроэрозионной обработке алмазных кругов:

$$f_{\Gamma} = \frac{v}{l_3},$$

где *v* — скорость вращения алмазного круга.

Исследования в работе [3] показывают, что максимальная производительность электроэрозионного профилирования достигается при скорости вращения алмазного круга *v* от 1 до 4 м/с. При повышении скорости более 4 м/с форма лунок, образующихся вследствие прохождения электрических разрядов, вытягивается, одновременно уменьшаясь по глубине и сужаясь по ширине по мере прекращения разряда, в результате чего объём удаляемого материала резко сокращается.

В таблице представлены расчётные значения частоты технологических импульсов в зависимости от характеристик рабочей поверхности шлифовальных кругов.

Таким образом, разработанный алгоритм экстремального регулирования, обеспечивающий подачу профилирующего электрода при достижении максимальной средней мощ-

Расчётные значения частоты разрядных импульсов

Зерни-	Частота разрядных импульсов, кГц (при скорости шлифовального круга 3 м/с)								
алмазного порошка,	Ko	Концентрация алмазного порошка, %						%	
MKM	25	50	75	100	125	150	175	200	250
250/200	1	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7
200/160	1,3	1,5	1,8	2	2,3	2,5	2,8	3	3,3
160/125	2	2,3	2,5	2,7	3	3,3	3,5	3,7	4,3
125/100	2,2	2,4	2,7	3,1	3,5	3,8	4	4,5	5
100/80	2,7	3	3,3	3,5	3,8	4,3	4,6	5	5,5
80/63	2,8	3,1	3,5	4,6	5,5	5,8	6,3	7	7,5
63/50	3,5	4,3	4,5	5,2	6	6,7	7,2	7,5	7,9
50/40	4,5	5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,4	10	10,7

ности, выделяемой в межэлектродном промежутке, позволяет повысить производительность и стабилизировать процесс электроэрозионного профилирования.

Разработанная процедура расчёта среднего расстояния между алмазными зёрнами позволяет рассчитать нижнюю границу частоты рабочих импульсов при электроэрозионном профилировании алмазно-абразивного инструмента. Адекватность расчёта величины среднего расстояния между алмазными зёрнами подтверждена определёнными статистическими характеристиками рабочей поверхности алмазных шлифовальных кругов, а также фотографированием этой поверхности.

Расчётные значения частоты рабочих импульсов, в зависимости от характеристик рабочей поверхности алмазных шлифовальных кругов, позволят назначать оптимальные технологические режимы профилирования.

Библиографические ссылки

1. **Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А.** Автоматизированные электроэрозионные станки. Л.: Машиностроение, 1984. 227 с.

- 2. Атрощенко В.В., Голубятников А.Г., Лахмостов А.Б., Митрофанов А.А., Полянин В.И. Повышение эффективности электроэрозионной обработки методом гибкого энергетического воздействия // Авиационная промышленность. 1989. Вып. 10. С. 40—43.
- 3. **Чачин В.Н., Дорофеев В.Д.** Профилирование алмазных шлифовальных кругов. Минск: Наука и техника, 1974. 160 с.
- 4. **Семёнов А.Д., Никиткин А.С.** Моделирование системы автоматического регулирования межэлектродного зазора при электроэрозионном профилировании алмазных кругов // Надёжность и качество 2009: тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза: Изд-во ПГУ, 2009. Т. 1. С. 270—273.
- 5. **Авдеева О.В., Никиткин А.С., Семёнов А.Д.** Система экстремального регулирования приводом подачи // Новые промышленные технологии. 2011. № 3. С. 46—49.
- 6. **Изерман Р.** Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
- 7. **Азарова Н.В., Матюха П.Г.** Влияние способа правки алмазного круга на характеристики его рабочей поверхности // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. 2007. С. 16—20.
- 8. **Соколов В.О.** Комплексное обеспечение точности профильной алмазно-абразивной обработки: дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2000. 497 с.

УДК 681.518

Чэнь Даньхэ

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) cranefeeling@ hotmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА МАЛОЕ НЕБЕСНОЕ ТЕЛО ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Рассмотрены особенности углового движения космического летательного аппарата при посадке на поверхность малого небесного тела. Исследованы варианты посадки космического аппарата с использованием прижимных двигателей и троса. Определены параметры работы системы посадки с использованием системы закрепления космического посадочного аппарата в различных условиях. Рекомендованы оптимальные условия закрепления космического посадочного аппарата на поверхности малого небесного тела.

Ключевые слова: космический посадочный аппарат; малое небесное тело; закрепление космического посадочного аппарата; оптимальные условия.

The angular motion features of the spacecraft when landing on the surface of a small celestial body are considered. Different variants of the spacecraft landing through the use of clamping motor and cable are stadied. The work parameters of the landing system through the use of a space lander fastening system in different conditions are determined. The optimal fastening conditions of the space lander on the small celestial body surface are recommended.

Keywords: space lander; small celestial body; space lander fastening; optimum condition.

Введение. В последние годы исследование малого небесного тела (астероиды, кометы, т.д.) является важным направлением в косми-

ческой деятельности, так как осуществляются запуски космического аппарата на малые небесные тела. Ранее был предложен метод

расчёта динамики углового движения космического спускаемого аппарата при посадке на поверхность небесного тела с малым гравитационным полем [1]. Ниже приведён расчёт динамики углового движения космического посадочного аппарата (КПА), выполненный с использованием разработанной методики, основанной на трёх опорах посадочного аппарата с учётом влияния прижимных двигателей и натяжения троса при закреплении аппарата на поверхности малого небесного тела [2, 3].

Анализ влияния прижимных двигателей на посадку. Исследование проведено на основе практической задачи посадки КПА с использованием методики расчёта параметров динамики движения КПА при посадке на поверхность малого небесного тела. Задача посадки осуществится на поверхности Фобоса со следующими конструктивными характеристиками КПА и начальными условиями посадки:

$$\begin{split} & m = 900 \text{ kg; } J_x = 800 \text{ kgm}^2; \\ & J_y = 300 \text{ kgm}^2; J_z = 800 \text{ kgm}^2; \\ & x_{\rm cp} = 0; y_{\rm cp} = -0.4 \text{ m; } z_{\rm cp} = 0; \\ & x_{c1} = 1.2 \text{ m; } y_{c1} = -1.0 \text{ m; } z_{c1} = 0; \\ & x_{c2} = 0.9 \text{ m; } y_{c2} = 0.2 \text{ m; } z_{c2} = 0; \\ & x_{c3} = 0.8 \text{ m; } y_{c3} = -0.4 \text{ m; } z_{c3} = 0.3; \\ & x_{c4} = 0.8 \text{ m; } y_{c4} = -0.4 \text{ m; } z_{c4} = -0.3; \\ & \Delta_1 = 0; \Delta_2 = 120; \Delta_3 = 240; \\ & \mu_1 = 0.1; \ \mu_2 = 0.1; \ \mu_3 = 0.1; \\ & \theta_g = 0; \ \psi_g = 0; \ g = 0.006 \text{ mc}^{-2}; \\ & \delta_0 = 0.001 \text{ m; } F_0 = 5000 \text{ H; } P = 200 \text{ H; } \\ & y_0 = 2.01 \text{ m; } x_0 = 0 \text{ m; } \\ & V_{v0} = -1.5 \text{ m/c; } V_{x0} = 0 \text{ m/c.} \end{split}$$

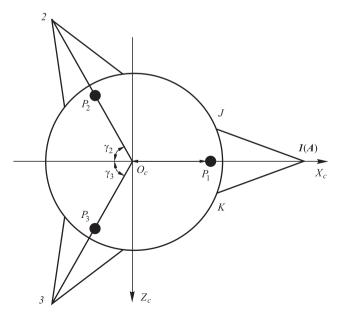
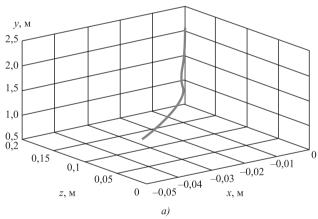


Рис. 1. Вид КПА с тремя опорами

На рис. 1 показан КПА (сверху) с закреплениями прижимных двигателей. 1, 2, 3 — это точки касания опор поверхности небесного тела. P_1, P_2, P_3 — места расположения прижимных двигательных установок (ДУ). Углы γ_2, γ_3 определяют разворот второй и третьей опор относительно оси $O_c X_c$.

Рассмотрим варианты посадки КПА при использовании прижимных двигателей, установленных на КПА, и включающихся при разных режимах. Отметим, что NV — номер варианта включения двигателей прижатия. При NV = 1 двигатели включаются, когда любая одна опора коснулась поверхности; при NV = 2, — когда любые две опоры коснулись поверхности; а при NV = 3, — когда скорость КПА по оси OY положительная. Пусть сила тяги прижимных двигателей P = 200 H, а сила натяжения троса T = 0 H. Результаты расчётов показаны на рис. 2-6.

Полученные результаты расчёта показывают, что посадка с применением прижимных двигателей и определённой силой тяги



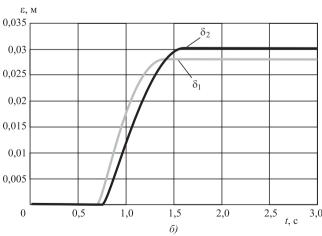


Рис. 2. Графики включения двигателей при NV = 1: a — посадка в трёхмерном виде; δ — изменения деформации в амортизаторах опор I, 2

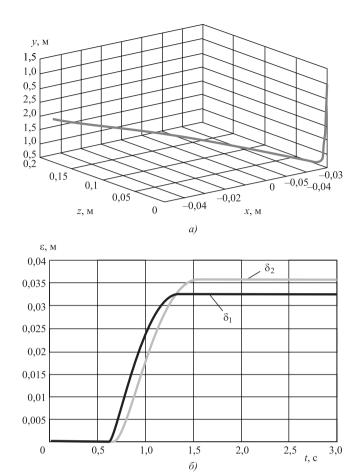


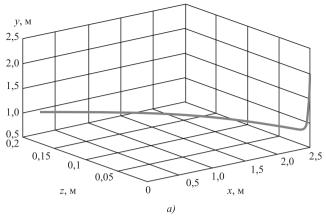
Рис. 3. Графики включения двигателей при NV=2: a — посадка в трёхмерном виде; δ — изменения деформации в амортизаторах опор I, 2

не обеспечивает надёжную посадку. Из трёх режимов работы прижимных двигателей двигатели, включающиеся при положительной вертикальной скорости КПА, имеют большую устойчивость для успешной посадки по сравнению с другими вариантами.

Анализ влияния натяжения троса на посадку. Посадка на поверхности малого небесного тела совершается с использованием прижимных двигателей всегда с ограничением. При этом приведено применение собственного устройства — якоря-пенетратора, выстреливающегося в грунт поверхности небесного тела при посадке и при постоянной силе натяжения вниз [4].

Величина силы натяжения троса задаётся программой расчёта и составляет 200 H, а момент возникновения силы натяжения троса определяется двумя вариантами расчёта:

сила натяжения возникает сразу после выстрела пенетратора и действует всё время процесса посадки КПА;



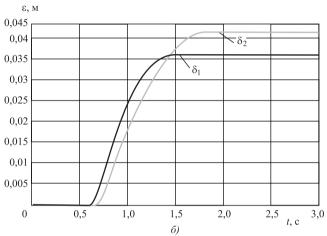


Рис. 4. Графики включения двигателей при NV = 3: a — посадка в трёхмерном виде; δ — изменения деформации в амортизаторах опор 1, 2

сила натяжения троса возникает при условии увеличения длины троса, трос начинает притягивать аппарат на высоте один метр и до момента окончания посадки.

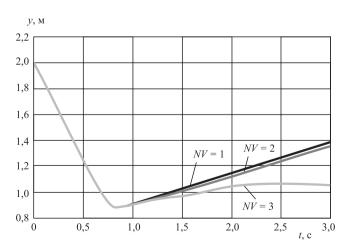


Рис. 5. Сравнения характеристик вертикального положения ц.м. $K\Pi A$

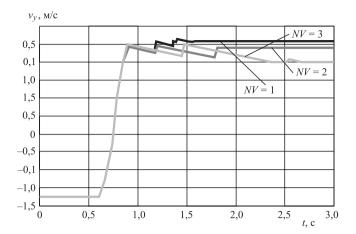
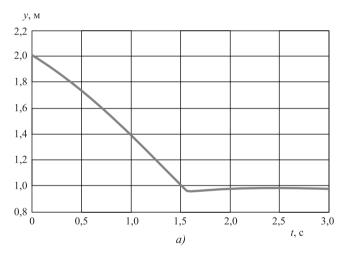


Рис. 6. Сравнения характеристик вертикальной скорости ц.м. КПА

В таких случаях выбираем режим работы прижимных двигателей NV=3. Начальный угол тангажа КПА равен нулю. Рассмотрим посадку при натяжении силы троса за всё время посадки. Результаты приведены на рис. 7.



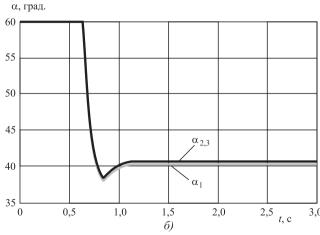


Рис. 7. Трос работает при $T=200~{\rm H},\ P=200~{\rm H}:$ a — изменения вертикальной координаты ц.м. КПА; δ — углы откоса между стержнями и поверхностью

Далее приведён анализ результата при натяжении троса на высоте один метр. Натяжение силы троса является постоянной величиной.

Результаты расчёта показали, что на конечном этапе посадки два режима работы троса не сильно влияют на посадку. Приведённый способ закрепления может обеспечить более устойчивую посадку. Угол откоса между стрежнями и поверхностью небесного тела составляет 40°.

Проанализируем влияние величины натяжения троса на посадку. Пусть постоянная сила натяжения троса T = 200, T = 300 и T = 400 Н. В обоих случаях трос действует за всё время посадки (рис. 8 и 9).

Из представленных выше результатов расчёта можно сделать вывод о том, что величина силы натяжения троса влияет на посадку. Если сила натяжения относительно маленькая, то трос не сможет притянуть КПА на поверхность небесного тела. Для этого необходима достаточная сила натяжения, которая может уменьшить смещение по осям X, Z и обеспечить успешную посадку аппарата.

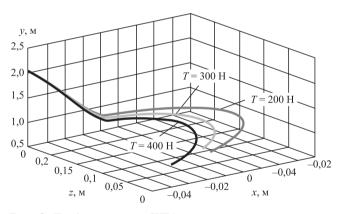


Рис. 8. График посадок КПА при разных значениях натяжения троса

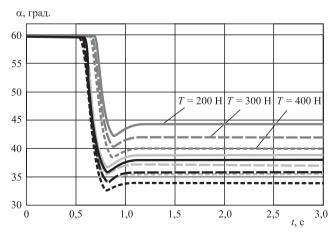


Рис. 9. Изменение углов откоса между стержнями и поверхностью

Заключение. Таким образом, рассмотренные случаи и полученные результаты показывают, что комплексирование системы (прижимные двигатели и система троса) закрепления КПА обеспечивает успешную посадку на поверхность малого небесного тела. Самыми рекомендуемыми условиями для посадки КПА на поверхности малого небесного тела являются такие начальные заданные параметры, как действие системы троса за всё время посадки с силой натяжения $T=400~\mathrm{H}$ и начало работы прижимных двигателей, когда скорость по оси Y положительная.

Данное исследование имеет важное значение для нахождения оптимальных условий посадки КПА и выполнения им следующих поставленных задач. Успешная посадка КПА позволяет в дальнейшем не только исследо-

вать динамику полёта космических летательных аппаратов, но и развивать космическую программу в целом.

Библиографические ссылки

- 1. **Казаковцев В.П., Корянов В.В., Чень Даньхэ.** Исследование динамики углового движения КА при его посадке на небесное тело с малым полем тяготения // Полёт. 2014. № 10. С. 47—53.
- 2. **Robert E. Lavender.** Touchdown Dynamics Analysis of Spacecraft for Soft Lunar Landing. NASA Technical Note D-2001. January 1964.
- 3. **Проектирование** спускаемых автоматических космических аппаратов. Под редакцией В.М. Ковтуненко. М.: "Машиностроение", 1985. С. 179—190.
- 4. Hilchenbach M., Kuèchemann O., Rosenbauer H. Impact on a comet: Rosetta Lander simulations. Planetary and Space Science 48 (2000). P. 361—369.

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:

и четырем 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

Ð

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.93'12

А.Н. Алфимцев, канд. техн. наук, доц., **П.А. Кукин** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) alfim@bmstu.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ГОРОДСКОГО ПЕЙЗАЖА МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Рассмотрен алгоритм детектирования визуального мусора на цифровых изображениях городского пейзажа. Проанализировано количество ошибок первого и второго рода в зависимости от различных параметров алгоритма. Представлены результаты визуальной оценки выходов станций Московского метрополитена Арбатско-Покровской линии. Экспериментально исследована корреляция визуальной загруженности выхода станции с пассажиропотоком.

Ключевые слова: цветовая модель HSV; алгоритм Кэнни; алгоритм Рамера—Дугласа—Пекера; рекламный щит; визуальный мусор; метрополитен; пассажиропоток.

A detection action algorithm of the visual garbage on digital images of the urban landscape is considered. Errors quantity of the first and second kind depending on the various algorithm parameters is analyzed. The visual assessment results of the Moscow Metro station outlet on the Arbat-Pokrovskaya line are introduced. Experimentally investigated The correlation of the station outlet visual workload to passenger traffic is experimentally stadied.

Keywords: color model HSV; Kenni algorithm; Ramer—Douglas—Packer algorithm; billboard; visual garbage; Metro; passenger traffic.

Введение. На улицах г. Москвы имеется огромное количество визуального мусора: рекламных щитов, объявлений и вывесок, которые портят облик города [1]. Визуальный мусор — это множество объектов городского пейзажа, которые ухудшают его облик — например, закрывают фасады исторических зданий, городские виды и пейзажи. Вопрос об оценке масштабов визуального "загрязнения" разных районов мегаполиса ставит задачу об автоматизации детектирования городского визуального мусора и измерении его количества.

Визуальный мусор на улицах города может включать в себя большое количество разнородных объектов: вывески, плакаты, афиши, табло с встроенным освещением и без него, бумажные объявления, объявления на асфальте, неправильная подборка цветов при покраске зданий, остановок, бордюра и прочих объектов городского пейзажа. Но в основном — это наружная реклама, которая отвлекает водителей от дороги, что часто приводит к дорожно-транспортным происшествиям. Согласно опросу фонда общественного мнения наружная реклама мешает 60 % москвичей [2].

Однако наружная реклама по определению должна бросаться в глаза и привлекать внимание, т.е. быть замеченной. Именно поэтому большинство щитов наружной рекламы со-

четает в себе яркие, броские цвета. В основном это жёлтые и красные цвета. Реклама в чёрно-белых тонах практически не встречается [3]. Прочие элементы городских пейзажей, которые не являются наружной рекламой, практически никогда не бывают ярких цветов. В основном это различные элементы ландшафта: строения, наружные пристройки (крыльцо), элементы фасада зданий (балконы), дороги, деревья, лавочки и т.д. На основании этого предположения в качестве основных признаков детектируемого объекта выбраны цветовые характеристики локальных участков цифрового изображения.

Классическим приёмом в методах компьютерного зрения при работе с выделением определённых цветовых характеристик объекта стал перевод цифрового изображения в цветовую модель HSV [4]. Например, гистограмма цвета кожи (в цветовой модели HSV) часто используется для детектирования людей на цифровых изображениях [5—7]. Также данный подход успешно применялся для детектирования удалённых от устройства видеозахвата объектов: исследованы характерные отличия гистограммы для всех трёх каналов H, S, V в разных условиях освещения [8], рассмотрены вопросы локализации и распознавания дорожных знаков [9], разработаны методы

детектирования движущихся объектов в системах окружающей интеллектуальности [10], исследованы вопросы одновременного детектирования нескольких объектов [11].

Для решения задачи детектирования щитовой рекламы на цифровых изображениях методы компьютерного зрения также активно используются. В отрасли наружной рекламы компания ADstruc (США) разработала программу для обработки кадастровых данных, которые представляют собой данные о единицах рекламного места на определённой территории [12]. Основной алгоритм детектирования рекламных щитов был написан на языке программирования Питон с использованием популярной библиотеки компьютерного зрения OpenCV [13—15]. Основная идея данного алгоритма заключается в поиске прямоугольников правильной формы на изображении с помощью метода выделения границ Харриса [16]. Другой подобный алгоритм разработан для обнаружения рекламных щитов в трансляциях спортивного телеканала [17]. Алгоритм должен был определить количество рекламных щитов, попадающих в трансляцию телеканала. Данный алгоритм основан на заранее известных особенностях размещения рекламных щитов и их геометрии (изображения чётко разделены монотонным полем зелёного цвета и имеют четырёхугольную форму). Используя цветовые данные на изображении, отсекается часть спортивной площадки и преобразованием Хафа извлекаются границы рекламных щитов [18].

Таким образом, главная цель — разработка нового алгоритма детектирования визуального мусора на цифровых изображениях городских пейзажей с использованием существующих методов компьютерного зрения, основанных на автоматическом анализе цвета и геометрических признаках детектируемого объекта. В качестве обоснования эффективности работы алгоритма будет экспериментально исследовано его функционирование на реальных изображениях г. Москвы.

Алгоритм детектирования визуального мусора. Рассмотрим пошагово алгоритм детектирования визуального мусора на цифровых изображениях городского пейзажа (рис. 1).

Шаг 1. Инициализация матрицы входного изображения. Входное цифровое изображение в матричной форме:

$$g(x, y), \tag{1}$$

где x, v — строка и столбец пикселя.

Шаг 2. Перевод изображения в цветовую модель HSV:

$$f(x, y) = HSV(g), (2)$$

где HSV(g) — изображение в формате HSV.

Шаг 3. Выделение цветовых участков с ограничением по каналам H, S, V:

$$C = \sum_{i=1}^{n} c_i, \tag{3}$$

$$c_i = Q_i f(x, y), \tag{4}$$

$$c(x_t, y_t) = f(x_t, y_t),$$

если
$$\begin{cases} H_{\min i} \leqslant H(x,y) \leqslant H_{\max i}; \\ S_{\min i} \leqslant S(x,y) \leqslant S_{\max i}; \\ V_{\min i} \leqslant V(x,y) \leqslant V_{\max i}, \end{cases}$$
 (5)

где C — массив изображений c_i , полученных из изображения f(x, y) отсеиванием пикселей каналов H, S и V, параметры которых не входили в определённый диапазон цвета; Q — оператор выделения определённого диапазона цвета.

Шаг 4. Пороговая фильтрация полученных изображений:

$$S = \sum_{i=1}^{m} P_{j} \sum_{i=1}^{n} Q_{i} f(x, y),$$
 (6)

где S — массив всех изображений, полученных пороговой фильтрацией изображений f(x, y); P — оператор, преобразующий цветное изображение в формате HSV в пороговое.

Шаг 5. Применение алгоритма Кэнни, состоящего из пяти этапов: сглаживание изображения, поиск градиентов, подавление немаксимумов, двойная пороговая фильтрация и подавление второстепенных краёв [19].

Шаг 6. Выделение контуров на входном изображении [20].

Шаг 7. Аппроксимация контуров алгоритмом Рамера—Дугласа—Пекера [21]. Массив аппроксимированных контуров изображений S после преобразования алгоритмом Кэнни обозначим A:

$$A = \sum_{k=1}^{l} a_k,\tag{7}$$

$$a_k(x, y) = O_{rdp} K_k F_{Canny} \sum_{i=1}^{m} P_j \sum_{i=1}^{n} Q_i f(x, y),$$
 (8)

где O_{rdp} — оператор, аппроксимирующий контуры; K_k — оператор, возвращающий контуры на изображении; F_{Canny} — оператор алгоритма Кэнни.

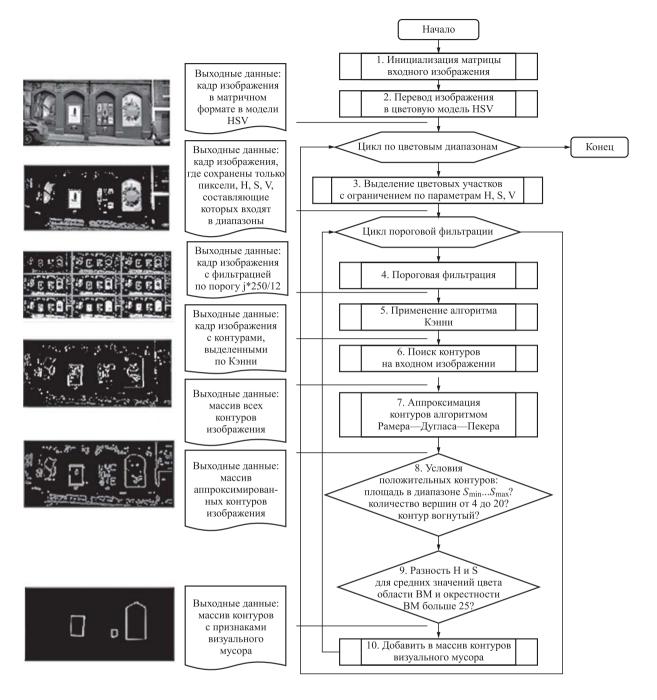


Рис. 1. Алгоритм детектирования визуального мусора с примерами пошаговой обработки цифрового изображения

Шаг 8. Отсеивание контуров по специальным параметрам. Все контуры, подходящие по площади, количеству вершин и выпуклости — это контуры визуального мусора входного изображения g(x, y):

$$Z=A,$$
 если $egin{cases} S_{\min}\leqslant S(a_k)\leqslant S_{\max};\ N_{\min}\leqslant N(a_k)\leqslant N_{\max};\ V(a_k)=1. \end{cases}$ (9)

Шаг 9. Отсеивание ошибки первого рода на основе экспериментально подобранного параметра *Th* (подробно рассмотрено далее).

Шаг 10. Добавление оставшихся после шагов 8 и 9 контуров в массив контуров визуального мусора.

Верхняя оценка вычислительной сложности алгоритма. Пусть N равно количеству пикселей изображения. Вычислительная сложность шагов 2, 3 и 4 равна O(N). Вычислительная слож-

ность алгоритма Кэнни составляет $O(N\log N)$. Сложность выделения массива контуров из изображения $O(n\log n)$. Сложность алгоритма Рамера—Дугласа—Пекера в цикле по n составляет $O(mn\log m)$, где m — количество вершин контура; n — количество контуров. Сложность шага 8 в цикле по n — это $O(n^2)$; а сложность шага 9 в цикле по n — $O(n^2\log n)$. Таким образом, верхняя оценка вычислительной сложности алгоритма составит: $O(N) + O(N) + O(N) + O(N\log N) + O(n\log n) + O(mn\log n) + O(n^2) + O(n^2\log n) = O(mn\log n) + O(n^2\log n)$.

Условия эксперимента. Для проведения эксперимента создана выборка из 1900 фотографий выходов основных станций метро Арбатско-Покровской линии. К каждой фотографии применён описанный выше алгоритм детектирования визуального мусора. Время обработки одного изображения с разрешением 600×400 пикселей (на процессоре Intel(R) Core(TM) і5 с частотой 1,5 ГГц, ОЗУ 4 Гб) в среднем составила 2,7 с. Все фотографии были получены при одинаковых условиях: расстояние от точки съёмки до выхода из метро не больше 2 м; в кадр включена часть городского пейзажа с наибольшей визуальной загруженностью, определённой экспертно; все снимки сделаны с помощью одного и того же объектива и фотокамеры.

На рис. 2 (см. обложку) приведены несколько самых характерных изображений с результатами поиска визуального мусора. На рис. 2, а (см. обложку) — фото выхода станции "Молодёжная": из-за близкого расположения торгового центра площадь визуального мусора на порядок больше, чем у других станций. На рис. 2, б (см. обложку) — фото выхода станции "Арбатская", один из лучших результатов. На рис. 2, в (см. обложку) — фото выхода станции "Площадь революции". На фото нет визуального мусора, однако по ошибке выделен яркий переход и яркий дорожный знак.

Анализ полученных результатов. Ошибка первого рода или ложноположительный результат в данном случае это объект, который был выделен алгоритмом, но не является визуальным мусором. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что в основном в качестве ошибки первого рода выступают контуры окон, деревьев, дорожных знаков, разметки. Области данных контуров почти всегда отличаются светлыми, тусклыми тонами и небольшим разнообразием оттенков (рис. 3, см. обложку).

Ошибка второго рода (ложноотрицательный результат) — это контур, являющийся

визуальным мусором, но не выделенный алгоритмом. Ошибки второго рода — это те элементы визуального мусора, которые обладают тусклыми, тёмными и недостаточно яркими тонами и, как следствие, не попадают в выбранный диапазон цвета. Это происходит по двум причинам: объект (или его часть) находится в тени (левая часть рис. 4, см. обложку); объект отражает солнечный свет (правая часть рис. 4, см. обложку). Для решения этой проблемы можно увеличить диапазон цветовых составляющих, но в таком случае повышается вероятность появления ошибок первого рода.

Уменьшение количества ошибок первого и второго рода. Для решения задачи уменьшения количества ошибок были апробированы несколько методов: сравнение средних значений пикселей по каналу Н детектируемого объекта и локальной области; средних значений пикселей Н и S объекта и локальной области; средних значений пикселей Н, S и R, G, B объекта и локальной области. Все они были построены на сравнении цветовых характеристик выделенного объекта, который, предположительно, является элементом визуального мусора, и цветовых характеристик локальной области изображения — "рамки" выделенного элемента.

На рис. 5 (см. обложку), видно, что у найденных объектов, не являющихся визуальным мусором, локальная область вокруг объекта имеет схожие цветовые характеристики. В свою очередь, по определению, визуальный мусор сильно выделяется в своей локальной области и имеет явно выраженные цветовые характеристики. Для выявления цветовой характеристики, которая при сравнении отсечвала бы наибольшее количество элементов, использовался метод сравнения средних значений цветового тона "Hue" и насыщенности "Saturation" объекта в локальной области.

Сравнение цветового тона и насыщенности найденного элемента в локальной области. Данный метод основан на следующем предположении: если взять средний цвет локальной области и найденного объекта в формате HSV, то параметр, равный средней величине цветового тона и насыщенности для ложноположительных результатов, будет практически одинаковый, в то время как для верноположительных результатов эти параметры будут различаться значительно сильнее. Иначе говоря, именно схожесть тона и насыщенности двух областей больше указывают на то, что данная область была выделена по ошибке. Для выявления этой зависимости проведён

эксперимент, заключающийся в том, что для каждого найденного элемента запускался алгоритм сравнения тона локальной области и объекта. Если модуль разности значений $\frac{H+S}{2}$ для внешней и внутренней области был меньше специального параметра Th , то это означало, что найдена ошибка первого или второго рода:

$$\left| \frac{H_{element} + S_{element}}{2} - \frac{H_{area} + S_{area}}{2} \right| > Th = TrR, (10)$$

$$\left| \frac{H_{element} + S_{element}}{2} - \frac{H_{area} + S_{area}}{2} \right| < Th \implies FaR, (11)$$

где $H_{element}$, $S_{element}$ — значение цветового тона объекта, насыщенности объекта; H_{area} , S_{area} — значение цветового тона локальной области, насыщенности локальной области; TrR — верноположительный результат; FaR — ложноположительный результат.

Эмпирически было найдено, что большое количество ошибок отсеивается при значении Th от 10 до 30 [22, 23]. Поэтому данный параметр используется на 9-м шаге алгоритма. Результаты работы алгоритма с параметром Th и без него представлены на рис. 6 (см. обложку). Экспериментальное исследование выборки фотографий с параметром Th = 25 позволило получить следующие результаты:

уменьшение ошибок первого рода в среднем на 30 %;

уменьшение ошибок второго рода в среднем на 87 %.

Исследование визуальной загруженности выходов из метро. Для формализации визуальной оценки городских пейзажей выходов станций метро был введён специальный критерий "визуальная загруженность" — отношение пассажиропотока станции на единицу площади обнаруженного на цифровом изображении визуального мусора,

$$V = N/S, (12)$$

где V — визуальная загруженность выхода из станции метро; N — пассажиропоток станции в день; S — площадь визуальной рекламы на фото выхода из метро.

Пассажиропоток — характеристика, выражающая количество людей, вышедших из метро (измеряется в чел./день). Для нахождения данной характеристики использовались открытые данные пассажиропотока московского метрополитена [24]. По полученным данным (рис. 7 и 8, см. обложку) можно сде-

лать вывод, что существует определённая корреляция между пассажиропотоком станций и количеством визуального мусора на выходах станций. В некоторых местах чётко прослеживается одновременный спад и рост функций, а пять последних станций и вовсе имеют практически идентичные значения у двух различных функций. Это логично — ведь возле станций метро, которыми пользуется большее количество людей, должно быть больше рекламных щитов, плакатов, торговых центров и т.д. Также можно выделить такую характеристику, как визуальная загруженность выхода из метро. На рис. 9 (см. обложку) чётко видно, что наименее загруженной станцией является "Площадь революции", так как это центр города и наружной рекламы там не может быть, потому что одним из основных видов деятельности департамента средств массовой информации и рекламы в г. Москве является регулирование отношений в сфере размещения наружной рекламы на улицах г. Москвы, в особенности центра города. Однако также можно увидеть, что станции "Курская" и "Молодёжная" являются наиболее визуально загруженными станциями. Такие данные получились из-за близко расположенного к выходу из метро торгового центра на обеих станциях.

Заключение. Таким образом, предложен новый алгоритм детектирования визуального мусора на цифровых изображениях, основанный на методах компьютерного зрения. В отличие от существующих решений алгоритм использует только локальную информацию на цифровом изображении для детектирования рекламных щитов. Кроме того, алгоритм не использует предопределенные позиции в изображении для детектирования объекта. Алгоритм является вычислительно эффективным, так как верхняя оценка его вычислительной сложности составила $O(n^2 \log n)$, где n — количество контуров. Результаты экспериментального исследования на реальных изображениях городских пейзажей г. Москвы позволили обосновать высокую точность (85 %) предложенного алгоритма. Эвристически были подобраны параметры алгоритма. Подтверждена корреляция между пассажиропотоком и визуальной загруженностью выходов станций метро, что может являться важным фактором определения качества жизни современного человека в мегаполисе.

Данный алгоритм может найти широкое применение в технологиях автоматизации обработки видеопотока, а также в коммерческих

сферах предоставления рекламных услуг для количественной оценки площади рекламного места по фотографиям и видеозаписям.

Библиографические ссылки

- 1. **Рогожникова М.А.** Типология заглубленного жилого дома // Architecture and Modern Information Technologies. 2013. № 1 (22). С. 13.
- 2. **Фонд** "Общественное мнение". URL: http://fom. ru (дата обращения: 10.12.2015).
- 3. **Агафонова А.В.** Особенности выбора цвета при разработке макетов наружной рекламы // Молодой учёный. 2014. № 6. С. 860—862.
- 4. Cunhaa J., Ferreiraa R., Laua N. Computer vision and robotic manipulation for automated feeding of cork drillers // Materials & Design. 2015. Vol. 82. P. 290—296.
- 5. **Das J., Roy H.** Human Face Detection in Color Images Using HSV Color Histogram and WLD // Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). 2014. P. 198—202.
- 6. **Хомяков М.Ю.** Классификация цвета кожи человека на цветных изображениях // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 3. С. 373—379.
- 7. **Ghimire D., Lee J.** A Robust Face Detection Method Based on Skin Color and Edges // Journal of Information Processing Systems. 2013. Vol. 9, Iss. 1. P. 141—156.
- 8. **Liu C., Lu X., Ji S., Geng W.** A fog level detection method based on image HSV color histogram // Progress in Informatics and Computing (PIC). 2014. P. 373—377. DOI: 10.1109/PIC.2014.6972360.
- 9. **Якимов П.Ю.** Предварительная обработка цифровых изображений в системах локализации и распознавания дорожных знаков // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37. № 3. С. 401—406.
- 10. **Kulkarni R.K., Surkutlawar S.** Shadow Suppression using RGB and HSV Color Space in Moving Object Detection // International Journal of Advanced Computer Science & Application. 2013. Vol. 4, Iss. 1. P. 164—169.
- 11. **Wen Y.N., Li H.S., Zhou H., Tang L.P., She J.Q.** Fusion of Background Subtraction and Frame Difference in HSV Space for Multi-Object Detection // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 380. P. 3895—3899.
- 12. **Krishna M.** Billboard Detection. URL: http://tech. adstruc.com (дата обращения: 10.12.2015).

- 13. **Каипбергенов Б.Т., Кадыров А.А.** Распознавание лиц на примере библиотеки OpenCV // Перспективы развития информационных технологий. 2015. № 24. С. 8-10.
- 14. **Stopkin S.V., Pugin K.V., Efimov S.S.** Lane detecting using OpenCV // Математические структуры и моделирование. 2012. № 26. С. 118—123.
- 15. **Розов А.С., Зюбин В.Е.** Расширяемая библиотека технического зрения для среды Labview на основе OpenCV // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 5. С. 26—28.
- 16. **Won K.H., Jung S.K.** Billboard sweep stereo for obstacle detection in road scenes // Electronics Letters. 2012. Vol. 48, Iss. 24. P. 1528—1530.
- 17. Wang Y., Tan L., Zhou J. Real-time billboard trademark detection and recognition in sports video // Proc. of Fifth International Conference on Machine Vision (ICMV 2012). Wuhan, China. 2013. P. 83—87.
- 18. **Rehman A., Saba T.** Features extraction for soccer video semantic analysis: current achievements and remaining issues // Artificial Intelligence Review. 2014. Vol. 41, Iss. 3. P. 451—461.
- 19. **Biswas R., Sil J.** An Improved Canny Edge Detection Algorithm Based on Type-2 Fuzzy Sets // Proc. of 2nd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT). Hooghly, India. 2012. № 4. P. 820—824.
- 20. **Chatbri H., Kameyama K., Kwan P.** A comparative study using contours and skeletons as shape representations for binary image matching // Pattern Recognition Letters. 2015. № 4. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.patrec.2015.04.007.
- 21. **Prasada D., Leungb M., Queka C., Choc S.** A novel framework for making dominant point detection methods non-parametric // Image and Vision Computing. 2012. № 11. P. 843—859. DOI: 10.1016/j.imavis.2012.06.010.
- 22. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.
- 23. **Неусыпин К.А., Шэнь К.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.
- 24. **Официальный сайт** Московского метрополитена. URL: http://mosmetro.ru/ (дата обращения: 10.12.2015).

Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 681.2:682.9

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц., **М.И. Бойчук** (Московский технологический университет)

mikaeva@ npo.lit.ru

ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Защитное покрытие относится к области электротехники и предназначено для использования в разрядных источниках излучения. Защитное покрытие на внутренней поверхности разрядных оболочек источников излучения содержит оксиды алюминия, иттрия, магния, циркония и тория. Оно позволяет повысить инертность горелки на внутренней поверхности разрядной оболочки по отношению к парам агрессивных металлов при высоких температурах и давлениях, а также в несколько раз увеличить срок службы ртутно-цезиевых ламп при незначительном снижении излучения в процессе работ, в пределах указанных значений срока службы.

Ключевые слова: защитное покрытие; срок службы; лампа; источник излучения; состав; покрытие; раствор.

The protective coating relevants to the electrical engineering field and is intended for use in the discharge radiation sources. The protective coating on the inner surface of the radiation sources discharge shells contains aluminium, yttrium, magnesium, zirconium and thorium oxides. The protective coating allows to improve the burner inertness on the inner surface of the discharge shells with respect to the pairs of aggressive metals at high temperatures and pressures, as well as to increase in several times lifetime of cesium mercury lamps at a slight radiation decrease in the work process within the lifetime specified values.

Keywords: protective coating; lifetime; lamp; radiation source; composition; coating; solution.

Защитное покрытие относится к области электротехники и предназначено для использования в разрядных источниках излучения.

Газоразрядные источники излучения представляют собой разрядную оболочку из тугоплавкого материала, электродные узлы и наполнение оболочки (инертный газ), а также излучающие материалы (ртуть и другие металы). В зависимости от величины давления наполняющих оболочку компонентов источники излучения делятся на лампы низкого и высокого давления [1].

Техническое решение по защите кварцевой оболочки бактерицидной амальгамной лапы низкого давления типа дуговая бактерицидная (ДБ), например ДБ 300 и др., выпускаемых ЗАО НПО "ЛИТ" [2], заключается в нанесении на внутреннюю поверхность кварцевой оболочки водорастворимой соли иттрия (например, водный раствор ацетата иттрия), которая после соответствующей термообработки превращается в тончайшую плёнку (несколько микрон) оксид иттрия, имеющую физическую связь с кварцем.

Оксид иттрия является более инертным соединением по отношению к парам ртути и других металлов, наполняющих оболочку, поэтому препятствует взаимодействию паров ртути с кварцем, т.е. потемнению кварцевого стекла в процессе работы лампы. Соответст-

венно, у такой лампы будет более стабильный лучистый поток при эксплуатации. Однако сказанное выше справедливо только для ламп низкого давления, тогда как в лампах высокой интенсивности, у которых пары ртути, излучающие добавки, и оболочка имеют более высокую температуру, чем в лампах низкого давления. В этом случае эффективность подобного покрытия снижается.

Ситуация усугубляется при использовании источников света, в которых излучающими добавками являются агрессивные металлы типа лития, натрия, калия и т.п. Кварцевые горелки при взаимодействии с агрессивной средой, дающей эффективное излучение в видимой или инфракрасной областях спектра, "разъедаются", т.е. темнеют в течение нескольких десятков часов работы.

Наиболее подходящим типом оболочки для высокоинтенсивных газоразрядных ламп высокого давления является поликор, который технологически в освоении имеет температуру плавления свыше 2000 °С. Подобная поликоровая оболочка используется в натриевых лампах высокого давления, в металлогалогенных лампах и в других специальных источниках света [3].

Известно покрытие для горелок литиевых ламп, содержащее оксиды иттрия, кальция, алюминия, лантана и одного из лантаноидов.

Однако это покрытие используется только в литиевых лампах и защищает оболочку от агрессивной среды разряда и разряда от паров материала оболочки. При этом к недостаткам покрытия относятся относительно невысокая термостойкость, недостаточная инертность и реализация только для паров лития, а для более активных сред не существует возможности использовать данный состав, например в натрий-цезиевых лампах высокого давления с улучшенной цветопередачей.

Приведённые недостатки покрытия устранены в предлагаемом защитном покрытии поликоровой оболочки, содержащем кроме оксидов алюминия и иттрия оксиды магния, тория и циркония. Состав защитного покрытия используется на внутренней поверхности поликоровых горелок, при этом после технологических процессов нанесения и обработки покрытия его толщина составляет от десятых долей микрона до 204 мкм. Состав покрытия формировался с учётом таких важных показателей, как термостойкость, химическая инертность, возможность изменения свойств с ростом температуры и т.д. Нанесённое покрытие формирует достаточно прозрачный слой, пропускающий видимое и инфракрасное излучение [4, 5].

Разработанное защитное покрытие существенно повысит стабильность характеристик ламп в процессе работы и увеличит физический срок службы источников излучения, использующих пары агрессивных металлов при высоких давлениях и температурах.

Поставлена цель — повысить инертность материала горелки на внутренней поверхности разрядной оболочки по отношению к парам агрессивных металлов при высоких температурах и давлениях. Указанная цель достигается тем, что защитное покрытие, кроме оксидов иттрия и алюминия, содержит оксиды магния, тория и циркония при следующем соотношении компонентов (в мас. %) оксидов: алюминия 50—65; иттрия 15—20; магния 10—15; циркония 6—7; тория 4—5.

Составы исходных растворов для проведения сравнительных испытаний, использовавшихся для приготовления покрытий, и составы применяемых покрытий приведены в табл. 1.

Смачиватель в исходных растворах нужен для более равномерного распределения покрытия по поверхности. Загуститель препятствовал преждевременному выпадению в осадок компонентов раствора во время испарения воды, а также способствовал лучшему сцеплению раствора и поликоровой оболочки горелки.

Проведены сравнительные испытания предлагаемых вариантов защитных покрытий. В горелки дуговых натриевых трубчатых ламп ДНаТ 250 дозировались амальгама цезия (т.е. наполнение ртутно-цезиевое 20 мг, цезия 25 мас. %, остальное — ртуть) и инертный газ — аргон, давлением 20 мм рт. ст. Изготовлено четыре партии ламп — три по предложенным составам и одна — контрольная, без покрытия. Покрытия наносили на внутреннюю поверхность горелок соответствующими растворами с последующей термообработкой при 150 °C (сушка), а затем при 900 °C (вжигание). Изготовленные образцы ламп по 20 шт. каждого типа включали в стандартную схему эксплуатации для ламп ДНаТ 250. Результаты испытаний и время работы ламп приведены в табл. 2.

Как следует из результатов испытаний, предложенный состав защитного покрытия

Таблица 1 **Составы сравнительных испытаний, масс.** %

Состав исходных растворов			Состав покрытия				
Соединение	1	2	3	Соединение оксида	1	2	3
Ацетат алюминия	5,3	6,6	5,9	алюминия	50	65	58
Ацетат иттрия	1,2	0,9	1,0	иттрия	20	15	17
Ацетат магния	2,7	1,7	2,1	магния	15	10	12
Ацетат циркония	0,6	0,5	0,8	циркония	10	6	9
Оксалат тория	0,3	0,2	0,2	тория	5	4	4
Смачиватель глицирил лаурат	0,2	0,2	0,2	_	_	_	_
Загуститель	Поливиниловый спирт						

Таблица 2 Результаты испытаний экспериментальных ламп типа ДНаТ 250

Состав	Покры- тие 1	Покры- тие 2	Покрытие 3	Без покрытия
Время работы и причины выхода из строя	210 и 227 ч, не зажи- гаются	114 и 169 ч, сла- бое потем- нение, не зажигаются	289 и 312 ч, не зажига- ются	25 и 19,5 ч, зна- чительное почернение образцов

позволяет в несколько раз увеличить физический срок службы ртутно-цезиевых ламп при незначительном снижении излучения в процессе работы в пределах указанных значений срока службы. Данное техническое решение распространяется и на разрядные оболочки из оксида алюминия с иными агрессивными наполнителями.

Библиографические ссылки

1. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 750 с.

- 2. **Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменкова С.В.** Ультрафиолетовые технологии в современном мире. М.: Изд. дом "Интеллект", 2012. 63—64 с.
- 3. **Микаева С.А., Микаева А.С., Петренко Ю.П.** Отражающее покрытие // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 7. С. 3—4.
- 4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Технология производства для нанесения покрытия на компактные люминесцентные лампы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 11. С. 24—29.
- 5. Микаева С.А., Микаева А.С., Синицина Л.В., Железникова О.Е. Покрытия на компактные люминесцентные лампы // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № . 2. С. 20—26.

УДК 629.7.036.001.4:65.011.56

Г.П. Шибанов, д-р техн. наук, проф.

(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)

gpshibanov@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ДРОССЕЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПЫТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрена технология построения дроссельной характеристики опытных газотурбинных двигателей (ГТД) на примере наиболее распространённого авиационного двухконтурного двигателя. При этом в качестве параметра, определяющего режим работы двигателя, принимается частота вращения ротора низкого давления. К этому параметру относят результаты измерений всех остальных параметров, по которым строится дроссельная характеристика опытного ГТД. Результаты измерений параметров обрабатываются с использованием известных и проверенных на практике методов математической статистики.

Ключевые слова: дроссельная характеристика; газотурбинный двигатель; технология; определяющий параметр; оценка.

The construction technology of the throttle characteristics for experimental gas turbine engine (GTE) are considered on the example of the most common two-spool aircraft engine. Rotation speed of low pressure rotor is utilized as the parameter determining the engine operating mode. This parameter includes the measurements results of other parameters, on which the experimental GTE throttle characteristic is constructed. The results of the parameters measurement are processed through the use of known and practice proven methods of mathematical statistics.

Keywords: throttle characteristic; gas turbine engine; technology; defining parameter; evaluation.

Практика испытаний опытных газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что построение их дроссельных характеристик целесообразно проводить методами регрессионного анализа. При этом результаты измерений параметров опытного ГТД, по которым строится дроссельная характеристика, необходимо относить к оценке параметра, определяющего режим работы двигателя. К такому определяющему параметру, применительно к двухконтурному авиационному двигателю, целесообразно отнести частоту вращения ро-

тора низкого давления $n'_{\rm H}$, оценку которого можно получить по методу, рассмотренному в работе [1].

Будем считать, что измерение параметров ГТД проводится на режимах i = 1, 2, ..., n, характеризуемых значениями $x_1, x_2, ..., x_n$ определяющего параметра.

Применительно к частоте вращения ротора низкого давления такими режимами будут: малый газ; 0,4 номинального; 0,7 номинального; 0,85 номинального; номинальный и взлётный.

Экспериментальное значение параметра x, определяющего режим работы двигателя, будем устанавливать с учётом процедуры приведения.

Зависимость измеряемого параметра ГТД от x, т.е. тяги или эффективной мощности, частоты вращения ротора высокого давления, секундного расхода топлива, температуры в характерных сечениях двигателя, положения рычага управления двигателем в зависимости от частоты вращения ротора низкого давления, в общем случае будем представлять в виде полинома m-й степени

$$y = \sum_{k=0}^{m} \alpha_i \omega_k(x), \tag{1}$$

где $m \le n$; α_k (k = 0, 1, 2, ..., m) — неизвестные параметры, подлежащие оценке;

 $\omega_k(x)$, k = 0, 1, 2, ..., m — полиномы Чебышева, удовлетворяющие соотношениям ортонормированности:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_i \omega_k(x_i) = \begin{cases} 0 \text{ при } k \neq j; \\ 1 \text{ при } k = j, \end{cases}$$
 (2)

где γ_i — некоторые константы, смысл которых будет выяснен ниже.

В частном случае, когда $\gamma_i = 1/n$, имеем

$$\omega_o(x) = 1;$$

$$\omega_k(x) = \frac{\sqrt{n\omega_k(x)}}{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^n \tilde{\omega}_k^2}} \quad \text{при } k = 1, 2, ..., n, \quad (3)$$

где

$$\tilde{\omega}_{k}(x) = x^{k} - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{k} \tilde{\omega}_{k-1}(x_{i})}{\sum_{i=1}^{n} \left[\tilde{\omega}_{k-1}(x_{i})\right]^{2}} \tilde{\omega}_{k-1}(x) - \dots - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{k}}{n}.$$
(4)

Будем считать, что на *i*-м режиме производится r_i кратное измерение параметра y. В результате на i-м режиме получается случайная выборка $y_{i\lambda}$ ($\lambda=1,\ 2,\ ...,\ r_i$) замеренных значений параметра $y_i=\sum_{k=0}^m \alpha_k \omega_k(x_i)$:

$$y_{i\lambda} = \sum_{k=0}^{m} \alpha_k \omega_k(x_i) + \Delta y_{i\lambda}$$

$$(i = 1, 2, ..., n; \lambda = 1, 2, ..., r_i),$$
(5)

где $\Delta y_{i\lambda}$ — случайные ошибки наблюдений y_i , которые будем считать несмещёнными и с переменными по режимам дисперсиями:

$$M(\Delta y_{i\lambda}) = 0; \ D(\Delta y_{i\lambda}) = \tilde{\sigma}_i^2.$$

Введём обозначения

$$\sigma_i^2 = \frac{\tilde{\sigma}_i^2}{r_i}; \tilde{\gamma}_i = \frac{1}{\sigma_i^2}; \sigma^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \tilde{\gamma}_i}; \gamma_i = \frac{\tilde{\gamma}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{\gamma}_i}. \quad (6)$$

Тогда квадратичная форма

$$Q = \sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{\lambda=1}^{r_i} \frac{(y_{i\lambda} - y_i)^2}{\tilde{\sigma}_i^2},$$

характеризующая уровень рассеивания экспериментальных данных около действительных значений параметра y_i на всей совокупности режимов, может быть записана в виде

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

гле

$$Q = \sigma^2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{\lambda=1}^{r_i} \frac{(y_{i\lambda} - \overline{y}_i)^2}{\tilde{\sigma}_i^2}; \quad Q_2 = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i (\overline{y}_i - y_i)^2.$$
 (7)

Форма Q_1 не зависит от α_k (k=0,1,2,...,m) и характеризует уровень рассеивания экспериментальных точек около средних экспериментальных значений параметра y в заданных режимах. Форма Q_2 определяет рассеивание средних \overline{y}_i около y_i и может быть использована для построения оценок $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m) неизвестных коэффициентов α_k (k=0,1,2,...,m). В соответствии с предписаниями метода наименьших квадратов оценки $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m) должны удовлетворять следующей системе необходимых условий минимума Q_2 (нормальной системе уравнений):

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \hat{\alpha}_s} = -2\sum_{i=1}^n \gamma_i \left[\overline{y}_i - \sum_{k=0}^m \hat{\alpha}_k \omega_k(x_i) \right] \omega_s(x_i) = 0,$$

$$s = 0, 1, 2, ..., m.$$

Отсюда, учитывая свойства ортогональности (2), получим формулу для вычисления оценок $\hat{\alpha}_k$:

$$\hat{\alpha}_k = \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_k(x_i) \overline{y}_i, k = 0, 1, 2, ..., m.$$
 (8)

Как видно из выражения (8), α_k не зависит от m, что является одним из достоинств задания y в виде (1).

Зная $\hat{\alpha}_k$ (k = 0, 1, 2, ..., m), можно построить оценку зависимости y(x) в виде

$$\hat{y} = \sum_{k=0}^{m} \hat{\alpha}_k \omega_k(x). \tag{9}$$

Оценка приведённой дроссельной характеристики $\hat{y}(x)$ будет иметь вид

$$\hat{\mathbf{y}}' = \overline{\chi}\hat{\mathbf{y}},\tag{10}$$

где $\overline{\chi}$ вычисляется по правилам, приведённым в работе [1].

Из соотношений (5) и (7) находим, что

$$M(\overline{y}_i) = y_i = \sum_{k=0}^m \alpha_k \omega_k(x).$$

Поэтому

$$M(\widehat{\alpha}_s) = \sum_{i=1}^n \gamma_i \omega_s(x_i) M(\overline{y}_i) =$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m \gamma_i \alpha_k \omega_k(x_i) \omega_s(x_i) =$$

$$= \sum_{i=1}^n \alpha_k \sum_{k=0}^m \gamma_i \omega_k(x_i) \omega_s(x_i).$$

Учитывая условия ортогональности (2), имеем

$$M(\hat{\alpha}_s) = \alpha_s, s = 0, 1, 2, ..., m,$$

что означает несмещённость (отсутствие систематической ошибки) оценок $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m). Отсюда следует несмещённость оценок \hat{y} и \hat{y}' , так как

$$M(\hat{y}) = \sum_{k=0}^{m} M(\hat{\alpha}_k) \omega_k(x) = \sum_{r=0}^{m} \alpha_k \omega_k(x) = y;$$

$$M(\hat{y}') = M(\overline{\chi}) M(\hat{y}) = \chi, y = y'.$$

Отметим, что оценка \hat{y}' зависимости y' в виде (10) получена без предположений независимости и нормальности ошибок частных измерений.

Пусть $y_{i\lambda}$ ($i=1,2,...,n,\lambda=1,2,...,r_i$) предполагаются независимыми. Тогда \overline{y}_i (i=1,2,...,n) также будут независимы. Кроме того, очевидно, что $M(\overline{y}_i)=y_i$ и

$$D(\overline{y}_i) = \sigma_i^2 = \frac{1}{\widetilde{\gamma}_i}.$$

Учитывая эти обстоятельства, а также соотношения (2) и (6) в случае независимых ошибок измерений, получим

$$D(\hat{\alpha}_{k}) = M \left[\sum_{i=1}^{n} \gamma_{i} \omega_{k}(x_{i}) y_{i0} \right] \left[\sum_{j=1}^{n} \gamma_{j} \omega_{k}(x_{j}) y_{i0} \right] =$$

$$= \sum_{i,j=1}^{n} \gamma_{i} \gamma_{j} \omega_{k}(x_{i}) \omega_{k}(x_{j}) M(y_{i0} y_{j0}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \gamma_{i}^{2} \omega_{k}^{2}(x_{i}) \sigma_{i}^{2} = \sigma_{2};$$

$$M(\alpha_{k0} \alpha_{s0}) =$$

$$= M \left[\sum_{i=1}^{n} \gamma_{i} \omega_{k}(x_{i}) y_{i0} \right] \left[\sum_{j=1}^{n} \gamma_{j} \omega_{s}(x_{j}) y_{j0} \right] =$$

$$= \sum_{i,j=1}^{n} \gamma_{i} \gamma_{j} \omega_{k}(x_{i}) \omega_{s}(x_{j}) M(y_{i0} y_{j0}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \gamma_{i}^{2} \omega_{k}(x_{i}) \omega_{s}(x_{i}) \sigma_{i}^{2} = \sigma^{2} \sum_{i=1}^{n} \gamma_{i} \omega_{k}(x_{i}) \omega_{s}(x_{i}) = 0,$$

где $\overline{y}_{i0} = \overline{y}_i - y_i$; индекс "0" обозначает центрированную случайную величину.

Таким образом, в рассмотренном случае оценки $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m) в выражении (9) оказываются некоррелированными и с одной и той же дисперсией, равной σ^2 .

Отсюда следует, что рассеивание функции \hat{y} (*x*) при каждом *x* определяется выражением

$$\sigma_{\hat{y}} = \sqrt{D(\hat{y})} = \sigma_{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} \omega_k^2(x)}},$$

которое является формулой коридора ошибок оценки $\hat{y}(x)$.

В случае когда рассеивание экспериментальных значений y_i подчинено нормальному закону, оценки $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m) оказываются нормально распределёнными и независимыми.

Если пренебречь рассеиванием $\overline{\chi}$, то коридор ошибок для \hat{y} будет определяться формулой

$$\sigma_{\hat{y}'} = \sqrt{D(\hat{y}')} = \overline{\chi} \sigma \sqrt{\sum_{k=1}^{n} \omega_k^2}.$$

Для практического вычисления оценок $\hat{\alpha}_k$, \hat{y} , \hat{y}' и коридоров ошибок необходимо знать параметры σ_i^2 , γ_i , σ^2 . В некоторых случаях, когда статистический материал испытаний недостаточен, эти параметры могут быть не-

известны. Тогда данные параметры следует заменять их оценками:

$$\begin{split} s_{1i}^2 &= \frac{1}{r_i(r_i-1)} \sum_{\lambda=1}^{r_i} (y_{i\lambda} - \overline{y}_i)^2 \ \ (\text{оценка} \ \ \sigma_i^2); \\ s_1^2 &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_{1i}^2}} \ \ (\text{первая оценка} \ \ \sigma^2); \\ \tilde{\gamma}_i &= \frac{s_1^2}{s_{1i}^2} \ \ \ (\text{оценка} \ \ \tilde{\gamma}_i). \end{split}$$

Так же можно показать, что для σ^2 существует вторая оценка S_2^2 , выражаемая формулой

$$S_2^2 = \frac{1}{n-m-1} \sum_{i=1}^n \gamma_i \left[\overline{y}_i - \sum_{k=0}^m \widehat{\alpha}_k \omega_k(x_i) \right]^2.$$

Как видно, величина S_2^2 , определяющая рассеивание коэффициентов $\hat{\alpha}_k$ (k=0,1,2,...,m) и, следовательно, рассеивание оценки \hat{y} , зависит от m. При отыскании зависимости y(x) в виде (1) стремятся выбрать m так, чтобы оценка S_2^2 достигала своего минимума (принцип Гаусса).

Оптимальная степень m полинома (1) в соответствии с принципом Гаусса определяется следующим образом. Строят оценки \hat{y} при различных m=0,1,2,... и каждый раз сравнивают последующие значения $S_2^2(m)$ с предыдущими $S_2^2(m-1)$. Последующая степень полинома m принимается как более подходящая, если $S_2^2(m)$ значимо меньше $S_2^2(m-1)$, что устанавливается по статистическому критерию Фишера. В соответствии с этим критерием оценка $S_2^2(m)$ считается значимо меньше оценки $S_2^2(m-1)$, если

$$\frac{S_2^2(m-1)}{S_2^2(m)} > F_q(n-m, n-m-1),$$

где $F_q(n-m,\,n-m-1)$ — квантиль распределения Фишера с $n-m,\,n-m-1$ степенями свободы при q-м уровне значимости критерия.

В некоторых случаях более эффективным оказывается другой способ построения оптимального полинома, который состоит в слелующем.

1. Задаются достаточно большим значением m < n и определяют оценки $\hat{\alpha}_k$ (k = 0, 1, 2, ..., m) по формуле (8).

2. Полученные значения $\hat{\alpha}_k$, начиная с наибольших значений k=m, m-1, ..., проверяют на значимость отличия от нуля при помощи критерия Фишера. Для этого про-

веряют неравенство $\frac{\hat{\alpha}_k^2}{S_2^2} > F_q(1, n-m-1)$, где $F_q(1, n-m-1)$ берут из таблиц распределения Фишера с 1, n-m-1 степенями свободы при q-процентном уровне значимости критерия [2]. Если записанное неравенство удовлетворяется, то $\hat{\alpha}_k$ удерживается в выражении \hat{y} ; в противном случае $\hat{\alpha}_k$ исключается.

При оценке дроссельной характеристики ГТД в виде (1), в том числе и в режиме поиска оптимальной степени полинома по принципу Гаусса, следует проверять гипотезу о том, что дроссельная характеристика ГТД может быть оценена полиномом заданной степени. В случае когда ошибки измерения подчинены нормальному закону, этот вопрос решается на основе следующих соображений. Если полином степени m удовлетворительно описывает результаты эксперимента, то различие между оценками S_1^2 , S_2^2 параметра σ^2 не должно быть значимым. В случае нормальных ошибок измерений отношение $\frac{S_2^2}{S_1^2}$ подчиняется распределению Фишера с $f_2 = n - m - 1$ и $f_1 = \sum_{i=1}^{n} r_i - n$ степенями свободы.

Поэтому, задаваясь уровнями значимости $q=(5;\ 1)$ % критерия проверки гипотезы о значимости различия S_1^2 , S_2^2 , следует проверить неравенство

$$F_{\frac{q}{2}}(f_2, f_1) < \frac{S_2^2}{S_1^2} < F_{1-\frac{q}{2}}(f_2, f_1),$$
 (11)

где $F_{\frac{q}{2}}(f_2,f_1), F_{1-\frac{q}{2}}(f_2,f_1)$ — квантили распределения Фишера, устанавливаемые по таблицам [2].

Если неравенство (11) выполняется, то различие S_2^2 и S_1^2 считается незначимым и гипотеза о соответствии полинома степени m результатам эксперимента принимается. В противном случае эта гипотеза отвергается.

В частном случае, когда $\tilde{\sigma}^2(x) = \sigma^2 = \text{const}$ и $r_i = r$, формулы упрощаются и принимают вид

$$\sigma_i^2 = \frac{\tilde{\sigma}^2}{r}; \sigma^2 = \frac{\tilde{\sigma}^2}{rn}; \overline{y}_i = \frac{1}{r} \sum_{\lambda=1}^r y_i \lambda;$$

$$s_{1}^{2} = \frac{1}{r(r-1)n^{2}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{\lambda=1}^{r} (y_{i\lambda} - \overline{y}_{i})^{2};$$

$$S_{2}^{2} = \frac{1}{n(n-m-1)} \sum_{i=1}^{n} \left[\overline{y}_{i} - \sum_{k=0}^{m} \widehat{\alpha}_{k} \omega_{k}(x_{i}) \right]^{2};$$

$$\gamma_{i} = \frac{1}{n}.$$

Для оценки σ^2 в общем случае может быть также использована величина

$$S^2 = \frac{s_1^2 f_1 + s_2^2 f_2}{f_1 + f_2},$$

где
$$f_i = \sum_{i=1}^n r_i - n$$
; $f_2 = n - m - 1$.

Как видно из приведённых построений, зависимость $\hat{y}'(x)$ является случайной. Поэтому возникает задача построения оценок точности и надёжности оценки $\hat{y}'(x)$.

Функции $\sqrt{D(\hat{y})}$ и $\sqrt{D(\hat{y}')}$, определяющие коридор ошибок, — одни из характеристик этой надёжности, показывающие, как велико может быть рассеивание $\hat{y}(x)$ и $\hat{y}'(x)$ на данном режиме x работы двигателя. Однако для более полной характеристики надёжности $\hat{y}(x)$ и $\hat{y}'(x)$ необходимо построение в плоскости (x, y) доверительных областей — полос, которые с вероятностью, близкой к единице, содержат оцениваемую зависимость. Если окажется, что реализация этой полосы находится в поле допуска, то с точностью до принципа практической уверенности можно

утверждать, что действительная дроссельная характеристика находится в пределах допуска.

Когда ошибки измерений независимы и подчиняются нормальному закону распределения, то

случайная величина
$$\chi = \frac{1}{s^2(m+1)} \sum_{k=0}^m (\hat{\alpha}_k - \alpha_k)^2$$
 имеет распределение Фишера с $m+1$, f степенями свободы. Поэтому, задаваясь доверительной вероятностью P , можно найти из таблиц данного распределения по входным данным $q=(1-P)\cdot 100,\ m+1$ и f параметр $\gamma=F_q(m+1,f)$.

Подводя итог проведённому выше анализу технологических процедур, реализация которых необходима для построения дроссельной характеристики опытных ГТД, нельзя не отметить, что их сложность определяется в основном отсутствием достаточных выборок измеряемых параметров на начальном этапе стендовых испытаний ГТД. Вместе с тем по мере накопления исходной статистической информации сокращается объём вычислений, связанных с оценкой достоверности результатов измерения текущих значений определяющих параметров двигателя, и процесс построения его дроссельной характеристики упрощается.

Библиографические ссылки

- 1. **Шибанов Г.П.** Оценка определяющих параметров газотурбинных двигателей при их автоматизированных испытаниях // Автоматизация. Современные технологии, № 6. 2016. С. 20—23.
- 2. **Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.** Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969, 511 с.

Вниманию авторов!

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

Ð

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-982

Д.В. Дробышев, К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф. (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) neysipin@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА ТРАНСПИРАЦИИ В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ

Рассмотрены методы исследования газодинамических потоков в вакуумных камерах. Предложено строить математические модели взаимодействия газа с поверхностью с помощью генетического алгоритма с низким коэффициентом жёсткости отбора, механизмами задерживающего отбора и гетерозиса.

Ключевые слова: вакуумная камера; эффект температурной транспирации; модель взаимодействия газа с поверхностью; генетический алгоритм.

The study methods of gas-dynamic flows in the vacuum chambers are considered. It is proposed to build a mathematical model of the gas interaction with the surface by using a genetic algorithm with low hardness selection factor, retarding selection mechanisms and heterosis.

Keywords: vacuum chamber; thermal transpiration effect; model of the gas interaction with the surface; genetic algorithm.

Введение. Современные технологические возможности, основанные на новых материалах и способах передачи тепла, более чувствительных и точных средствах измерений, позволили реализовать новые методы исследования газодинамических потоков, которые основаны на явлении термомолекулярной транспирации (ТМТ) [1—5]. Исследована система откачки, основанная на температурной транспирации. Отличительными особенностями такой системы являются отсутствие движущихся деталей, безмасленность, абсолютно бесшумная и безвибрационная работа. При анализе свойств системы и процессов её функционирования необходимо учитывать процессы, происходящие на границе газа с поверхностью на микроуровне.

Явление ТМТ имеет различную природу в зависимости от соотношения средней длины свободного пробега молекул в газе и диаметра капилляра. Отношение этих величин известно как число Кнудсена. В неравномерно нагретом цилиндрическом канале на режимах разреженности проявляются как свободномолекулярные, так и сплошносредные эффекты.

В открытом канале расход газа через канал очень сложно измерить в эксперименте. Закрытие канала приведёт к возникновению перепада давления в нём. В свою очередь, перепад давления создаст течение продавливания,

направленное в противоположную сторону. Наложение этих двух течений в конечном итоге при среднем расходе газа, равном нулю, приведёт к установлению некоторого перепада давления в канале, называемого термомолекулярной разностью давления (ТРД), которая поддаётся измерению в эксперименте. Однако для определения параметров течения, обусловленного эффектом ТМТ, необходимо знать характеристики соответствующего течения продавливания.

Анализ областей применения ТМТ показал, что сферу прикладного использования ТМТ можно разделить на две части по критерию габаритных размеров.

Малогабаритные системы откачки: при эффективном использовании эффекта ТМТ можно создавать откачивающие устройства, которые относятся в большей степени к насосам, откачивающим газ, а именно, к насосам, работающим благодаря эффекту температурной транспирации, или компрессору. Хотя такое устройство может иметь широкий спектр применения, оно особенно подходит для использования в портативных наземных системах.

Насосы, необходимые для откачки газа или забора газовой пробы из локальной внешней среды в различных системах. Многие из этих систем, таких как газовые сенсоры, химические реакторы, а также электронно-оптиче-

ские устройства, являются важным инструментом для исследований.

Большинство этих устройств имеют малые габаритные размеры и относятся к микроэлектромеханическим системам (MEMS). Соответственно, для того чтобы уменьшить массу, объём, энергопотребление системы, необходимо использовать миниатюрные компоненты
системы. Изготовление MEMS-устройств возможно только с использованием новейших
технологий обработки деталей на современном
оборудовании.

Крупногабаритные системы откачки: реальные вакуумные высокотемпературные системы защищаются тепловыми экранами (обычно пять экранов и более), вследствие этого увеличивается сопротивление потоку, что существенно ухудшает откачные характеристики объекта. Разработанная модель [6] предназначена для увеличения проводимости системы экранов и, как следствие, рассматриваемых эффектов — появление откачного эффекта.

Для исследования разнообразных явлений при взаимодействии газа с поверхностью твёрдого тела необходимо выявить физические процессы, которые сопровождают данное взаимодействие.

Классификация взаимодействия газа с поверхностью. Разнообразное множество явлений взаимодействия газа с поверхностью допускает различные классификации в зависимости от того, с какой точки зрения и по каким критериям проводится упорядочение. Например: на атомарном уровне — потенциалы взаимодействия, используя электронно-ядерные представления; на больцмановском — общепринятые функции взаимодействия; на промежуточном — функционалы с соответствующими весами, ведущими к частным коэффициентам обмена массой, импульсом и энергией, а на газодинамическом — полные коэффициенты обмена.

По физическому содержанию при моделировании от простого к сложному формулируются следующие задачи: столкновения бесструктурных частиц с простой кристаллической решёткой неподвижных атомов; эффекты кристаллической структуры и формы поверхностных граней [2, 4]; учёт температуры поверхности; кинетика адсорбированного слоя; статистическая шероховатость; влияние внутренних степеней свободы; взаимодействие заряженных частиц; химические реакции на поверхности; излучение.

Остановимся подробнее на некоторых из этих пунктов, оказывающих основное влия-

ние на рассматриваемый процесс: взаимодействие между газом и телом осуществляется частицами и электромагнитным полем.

При моделировании процесса взаимодействия атомов газа с поверхностью твёрдого тела используют следующие типы моделирования кристаллической решетки твёрдого тела: твёрдые кубы; мягкие кубы; твёрдые сферы; мягкие сферы.

При взаимодействии газа с поверхностью необходимо учитывать температуру поверхности, так как при столкновении происходит энергообмен между частицей и поверхностью, характеризуемый коэффициентами аккомодации энергии и импульса (КАЭ и КАИ). Кроме энергообмена существует гипотеза, что температура поверхности влияет на закон отражения частицы от поверхности. Согласно этой гипотезе вводятся модификация косинусного закона отражения и зависимость коэффициента аккомодации от температуры. Предполагается, что при определённой температуре, а также геометрии канала, по которому происходит течение газа, появляется откачной эффект, проявляющийся вследствие температурной транспирации. Созданы экспериментальные образцы насосов, принцип действия которых основан на этом эффекте [6, 7]. При построении распределений отражения нормальная составляющая коэффициента аккомодации импульса принята равной 1. Это значит, что тангенциальная составляюшая равна 0, что не соответствует реальности [2, 3]. При добавлении тангенциальной составляющей КАИ распределение частиц газа, отражённых от поверхности, поворачивается на некоторый угол [6], но до сих пор остаются только предположения о зависимости тангенциальной и нормальной составляющих от свойств поверхности и газа.

Для описания взаимодействия газа с поверхностью предлагается использовать хорошо зарекомендовавшие себя на практике коэффициенты обмена массой, импульсом и энергией, которые позволяют выразить потоки соответствующих компонент через параметры набегающего потока.

Следует различать два коэффициента аккомодации — КАЭ и КАИ, энергии и импульса соответственно. В свою очередь КАИ подразделяется на два вида [3]: касательный (тангенциальный) и нормальный импульсы. Эти коэффициенты в самом общем случае являются функциями свойств поверхности, падающей частицы и параметров удара.

Вектор параметров удара содержит в себе угол падения частицы и её ориентацию относительно системы координат поверхности [6, 7].

В многомерном пространстве параметров выделяют области, обладающие определённой спецификой с точки зрения упрощения постановки задач, методов решения и приложений. Одним из важнейших параметров является энергия набегающих частиц.

Экспериментальные исследования. Исследованию процессов, проистекающих на поверхности твёрдого тела при взаимодействии с частицами газа, посвящено много работ [1—6], получена богатая экспериментальная база в этой области, но нет чёткой интерпретации процесса с помощью формул — экспериментальные данные достаточно разрознены и распространяются в основном на частные случаи. Поэтому постановка собственных экспериментов и разработка новых методов анализа в данной области остаются актуальной задачей.

Построена математическая модель и проведены расчёты для нахождения оптимальной геометрии экспериментальной вакуумной камеры. Выявлено, что 30 ступеней в вакуумной камере достаточно для получения качественных результатов эксперимента. Ступенью насоса называется область, внутри которой проходит градиент температур. Камера сконструирована таким образом, чтобы вмещать в себя до 40 ступеней.

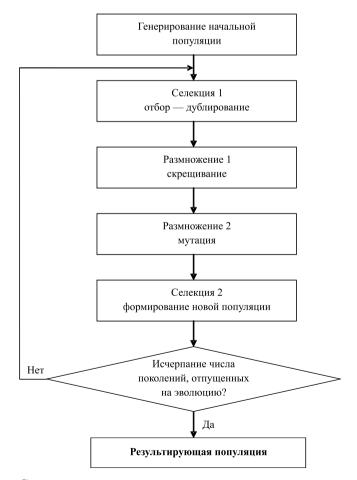
Обычно в практических приложениях математическое моделирование подобных моделей проводится методом Монте-Карло [6]. В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к точности, для построения математических моделей при проведении каждого эксперимента использован генетический алгоритм (ГА). Полученные с помощью ГА математические модели обладают высокой точностью, но не содержат явно выраженных связей между параметрами установки и исследуемого процесса, что затрудняет проведение аналитических исследований. Модель, полученная с помощью ГА, используется как эталон для моделей с априорной структурой, полученной на основе анализа исследуемых физических процессов и эксперимента. С помощью эталона вычисляется точность априорных моделей и принимается решение о возможности их дальнейшего использования.

ГА характеризуется минимальным объёмом априорной информации, а также возможностью построения моделей без учёта ряда суще-

ственных факторов. ГА оперируют с популяцией оценок потенциальных решений, используя принцип "выживает наиболее приспособленный". На каждом шаге алгоритма образуется новое множество приближений, создаваемое посредством процесса отбора индивидуумов согласно их уровню пригодности. Структурная схема классического ГА представлена на рисунке.

В качестве алгоритма построения модели выбран ГА с низким коэффициентом жёсткости отбора. Подобный выбор обусловлен отсутствием ограничений на время построения модели и возможностью получения наиболее точной модели. Исследуемая задача представляет собой задачу со сложным ландшафтом приспособленности, что может приводить к быстрой сходимости и превратиться в преждевременную сходимость к квазиоптимальному решению. Для предотвращения возникновения этого эффекта использован механизм задерживающего отбора.

При формировании родительской пары применяются инбридинг и аутбридинг, кото-



Структурная схема классического генетического алгоритма

рые особенно эффективны для многоэкстремальных задач [8]. Инбридинг приводит к концентрации поиска в локальных узлах, а аутбридинг предупреждает быструю сходимость к найденным решениям. Симбиоз этих методов реализован специальным правилом отбора моделей на каждом ряду селекции — гетерозиса.

Таким образом, не теряются лучшие решения и постоянно поддерживается достаточное разнообразие.

Для проведения экспериментальных исследований была использована оригинальная вакуумная камера, конструкция которой представляет собой корпус паромасляного диффузионного насоса, имеющего присоединительные фланцы для измерительной аппаратуры. Сложностью при конструировании данного экспериментального образца является наличие близко находящихся друг с другом как холодных участков камеры, так и нагретых. Для того чтобы выявить экспериментальную зависимость между законом распределения частиц газа от поверхности, необходимо создать наибольший перепад температур, тем самым увеличив градиент температур в системе. Поддержание большого градиента температур подразумевает большие значения излучения. Также в конструкции отсутствуют движущиеся детали, что позволяет не учитывать некоторые переменные скоростей.

Заключение. Исследована существующая теоретическая база для проведения эксперимента. На её основе, принимая во внимание все упущенные факторы, создан принципиально новый стенд по исследованию как процесса взаимодействия газа с поверхностью твёрдого тела, так и в частности эффекта тем-

пературной транспирации. Математические модели исследуемых процессов предложено строить с помощью ГА. Для использования выбран ГА с низким коэффициентом жёсткости отбора, механизмами задерживающего отбора и гетерозиса. На основе результатов проведения экспериментов разработан метод оценки точности построения моделей расчёта проводимости вакуумных камер, внутри которых применяются высокие температуры. Метод предусматривает использование модели ГА в качестве эталона.

Библиографические ссылки

- 1. **Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А.** Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
- 2. **Гудман Ф., Вахман Г.** Динамика рассеяния газа поверхностью. М.: "Мир", 1980. 426 с.
- 3. **Баранцев Р.Г.** Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975. С. 18—29.
- 4. **Дэшман С.** Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. 695 с.
- 5. **Hurlbut F.C.** On the molecular interactions between gases and solids, Dynamics of Manned Lifting Planetary Entry, Wileq, New York London, 1963. P. 754—777.
- 6. **Дробышев Д.В.** Создание экспериментальной вакуумной камеры для исследования эффекта температурной транспирации. Тр. второго междунар. симпозиума "Современные аспекты фундаментальных наук". М.: ИИУ МГОУ, 2015. С. 245—246.
- 7. **Никольский Ю.В.** Термомолекулярный насос с полупроводниковым термоэлементом // Матер. XII науч.-тех. конф. "Вакуумная наука и техника". М.: МИ-ЭМ, 2005. С. 3—7.
- 8. **Koza J.R.** Genetic Programming. Cambridge, The MIT Press, 1988. 368 p.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогам:

"Роспечать" — индекс **70537**;

"Пресса России" — индекс **27838**;

"Почта России" — индекс **60267**.

袋

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

УДК 629.7

А.В. Андронов, канд. техн. наук (Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск) andronov.plk@mail.ru

НАУЧНО ОБОСНОВАННАЯ МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА МОДЕРНИЗАЦИИ АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВОЕННО-ТРАНСПОРТНОЙ АВИАЦИИ

Обоснована методология управленческих решений на проведение модернизации или выбора её варианта для лица, принимающего решение на примере выбранного варианта модернизации военно-транспортного самолёта Ил-76МД.

Ключевые слова: лицо, принимающее решение; авиационный комплекс; экспертная оценка; модернизация авиационной техники; научный анализ.

The management solutions methodology for modernization and select its options for decision makers on the example of selected modernization variant of military transport Ilyushin Il-76MD aircraft is substantiated.

Keywords: decision maker; aviation complex; expert valuation; aircraft equipment modernization; scientific analysis.

В условиях продолжающегося кризиса, не обошедшего стороной и военно-транспортную авиацию, руководством авиастроительной отрасли принято решение о проведении модернизации военно-транспортных самолётов Ил-76МД. Решение объективно нужное, но не бесспорное, поскольку вместо проведения модернизации существующего парка было принято решение строить новую модернизированную партию этих самолётов.

В авиастроении понятие модернизации (как совершенствование летательного аппарата) является общепринятым. Самолёт изначально проектируется не на один десяток лет. Поэтому на протяжении своей лётной жизни авиационная техника постоянно совершенствуется с учётом практических результатов эксплуатации, научных достижений и открытий в авиационной отрасли до момента появления новой конструкции, превосходящей возможности модернизируемой. Такую модернизацию условно можно назвать "лёгкой" и осуществляется она в течение всего жизненного цикла с учётом экономической целесообразности, безопасности, требований научного и технического прогресса и должна охватывать весь существующий парк летательных аппаратов (ЛА). Другое дело "глубокая" модернизация. Отличительной особенностью "глубокой" модернизации является то, что она может быть сопряжена с производством новой партии ЛА на замену или в дополнение существующим. Необходимость такой модернизации возникает тогда, когда реализованный проект самолёта оказался столь удачным, т.е. концептуально шагнувшим настолько далеко вперёд от предшественников, что заложенные потенциальные возможности модернизации оставляют его конкурентоспособным в сравнении с существующими аналогами и даже с новыми разработками или когда таких разработок нет. В этом случае при принятии решения о модернизации существующего или строительстве нового парка модернизированных самолётов должна учитываться степень улучшения основных характеристик авиационного комплекса (АК) в сравнении с финансовыми затратами в том и другом случае, а также наличие новых перспективных разработок.

Перечисленные исходные предпосылки необходимости проведения модернизации АК имеют фундаментальный характер и мотивируют принимаемое решение лицом (ЛПР), имеющим на это полномочия. Однако окончательно сформированное решение, как показывает практика, должно приниматься с учётом мнения экспертной группы, в которую привлекаются в качестве экспертов высококлассные специалисты, работающие в авиационной отрасли. Экспертная группа, опираясь на научный анализ, готовит экспертное заключение по рассматриваемому вопросу. Надобность подобного подхода объясняется тем, что авиационная отрасль как наиболее технологическая и наукоёмкая, глубоко интегрирована с большинством отраслей народно-хозяйственного комплекса страны. Поэтому во вновь выпускаемой продукции всегда заложена значительная научно-техническая и технологическая новизна, требующая соответствующей компетентности и профессиональных знаний от экспертов, привлекаемых к оценке каждого образца авиационной техники. ЛПР без опоры на современные технологии научного анализа при оценке конкретного образца техники может допускать ошибки, приводящие к серьёзным материальным и финансовым потерям, порой отрицательно влияющим на уровень обороноспособности страны.

Коллективные экспертизы широко используются при сравнительных оценках образцов авиационной техники со своими предшественниками, зарубежными аналогами и в других необходимых случаях, к которым можно отнести и принятие решения о выборе варианта модернизации военно-транспортного самолёта (ВТС) Ил-76МД. Предлагаемая модернизация включает в себя замену двигателей Д-30КП на более мошные и экономичные ПС-90А-76, замену крыла с 3 на 2-лонжеронное (как более лёгкое), усиление стоек шасси, замену комплекса бортового оборудования и другие, менее значимые новшества. Разница вариантов модернизации заключается лишь в том, что в одном случае она проводится на существующем парке самолётов, а во втором строится партия новых модернизированных самолётов.

Именно это принятое ранее решение, исходя из реалий сегодняшнего дня, финансового дефицита и перспектив дальнейшего развития военно-транспортной авиации, можно считать недостаточно аргументированным, что заставляет обратиться к методологии подготовки подобных решений для обоснования необходимости при их принятии и опираться на экспертные заключения.

Для повышения достоверности и объективности проводимых экспертных оценок необходим научно обоснованный подход не только к проведению коллективных экспертиз, но и к порядку формирования самих экспертных групп.

Один из таких вариантов использования экспертов в качестве источников информации основывается на гипотезе о наличии у них — специалистов конкретной области знаний — гипотетических представлений об изучаемом предмете и априорных оценок значимости различных решений, являющихся результатом мобилизации их профессионального опыта и интуиции [1].

Соответствие эксперта этому комплексу требований характеризует его компетентность,

которая определяется структурой и весомостью аргументов и учитывается коэффициентом аргументации $K^{\rm apr}$, соответствующего формализованным сведениям о характере источников аргументации и степени влияния каждого источника на принимаемые экспертом решения, не превышая при этом значение $K^{\rm apr} \le 1$. Значение коэффициента аргументации для i-го эксперта при выбранных в работе [1] шести источниках аргументации (j=6) запишется в виде

$$K_i^{\text{apr}} = \frac{\sum_{j=1}^{6} Y_{ji}}{\sum_{i=1}^{6} Y_{ji}^{\text{max}}},$$

где Y_{ji} — оценка, отмеченная i-м экспертом по j-му источнику аргументации; Y_{ji}^{\max} — максимальная оценка по j-му источнику аргументации.

C учетом того, что $\sum\limits_{j=1}^6 Y_{ji}^{\max} = 1$, коэффициент K_i^{apr} имеет вид

$$K_i^{\rm apr} = \sum_{j=1}^6 Y_{ji}.$$

Осведомлённость эксперта в обсуждаемых вопросах учитывает коэффициент осведомлённости $K^{\text{осв}}$ и для i-го эксперта количество пунктов градации осведомлённости при вариации (v=5), принятой в работе [1], определяется по формуле

$$K_i^{\text{ocb}} = \frac{\sum_{\nu=1}^{5} \varphi_{\nu i}}{\sum_{\nu=1}^{5} \varphi_{\nu}^{\text{max}}},$$

где φ_{vi} — оценка, данная i-м экспертом по v-му пункту; φ_v^{\max} — максимальная оценка по v-му пункту.

Определение обобщённого мнения группы экспертов сводится к вычислению среднеарифметического ранга для f-го суждения по m-му вопросу S_{fm} с учётом числового значения коэффициента компетентности каждого эксперта по формуле

$$S_{fm} = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^{n^*} \frac{R_{if}}{K_i^{\text{KOM}\Pi}},$$

где R_{if} — ранг f-го суждения, назначенный i-м экспертом; $K_i^{\text{комп}}$ — коэффициент компетентности i-го эксперта; n^* — количество экспертов, назначивших ранг f-го суждения.

При сравнении суждений по m-му вопросу наиболее важной следует считать формулировку с наименьшим значением S_{fm} .

При необходимости степень согласованности мнений экспертов может быть оценена с помощью коэффициента вариации рангов K^{Bp} с учётом компетентности экспертов, давших сведения по f-му суждению. Вычисление коэффициента вариации рангов осуществляется в три этапа:

вычисляется дисперсия ранговых оценок, данных f-му суждению:

$$D_f = \frac{\sum_{i=1}^{n^*} \left[S_{fm} - \frac{R_{if}}{K_i^{\text{KOM}\Pi}} \right]}{n^*};$$

находится среднеквадратическое отклоне-

ние $\sigma_f = \sqrt{D_f}$; вычисляется числовое значение коэффициента согласованности ранговых оценок, данных f-й формулировке:

$$K_f^{\text{COFJ}} = \frac{S_{fm}}{\sigma_f};$$

на практике обычно находится в пределах

$$1,5 \leqslant K_f^{\text{согл}} \leqslant 2,5$$
 при $2,5 \leqslant S_{fm} \leqslant 3,5$.

Коэффициент компетентности і-го эксперта определяется как произведение коэффициентов аргументации и осведомлённости, т.е.

$$K_i^{\text{комп}} = K_i^{\text{арг}} K_i^{\text{осв}}.$$

Представительность (репрезентативность) экспертной группы в целом оценивается среднеарифметическим значением компетентности входящих в её состав экспертов, которая определяется по формуле

$$M(K_i^{\text{KOM}\Pi}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{\text{KOM}\Pi},$$

где п — количество экспертов, принимающих участие в экспертном опросе.

Экспертная группа считается представительной при условии

$$0.7 \le (K_i^{\text{KOM}\Pi}) \le 1.$$

Оценка представительности группы экспертов позволяет констатировать значимость результатов экспертного опроса для ЛПР по объекту оценки, гарантируя объективный и всесторонний анализ предоставленных материалов, максимально приближенный к реальному положению дел. Кроме того, имея в руках инструмент оценки представительности самой экспертной группы, ЛПР может не только судить о степени достоверности и объективности получаемой оценки для подготовки принятия решения, но и при необходимости ослаблять или усиливать эту степень, формируя группу экспертами с учётом их соответствующей осведомлённости или компетентности.

Требуемые ЛПР экспертные материалы могут иметь как формализованную, так и произвольную форму исполнения: в виде экспертных заключений, ответов на заранее поставленные вопросы, сравнительных оценок и т.д. Для оценки модернизации АК, с точки зрения целесообразности её проведения, предпочтительнее получение материалов сравнительной оценки прироста боевых свойств. Так, для ВТС — это разность между стоимостью выполнения боевой задачи и затратами на проведение самой модернизации в каждом из вариантов (случай с самолётом Ил-76МД). Для этого выполняется военно-экономическая оценка, главным показателем которой выступает эффект от модернизации АК [2]. Среди известных подходов, наиболее полно охватывающих данную проблему, можно выделить методику, по которой эффект от модернизации определяется как разность между стоимостью выполнения боевой задачи уже существующим в войсках и модернизированным ЛА [3].

Тогда в качестве критерия военно-экономической эффективности для выбора способа модернизации примем:

$$\mathfrak{I} = C_{c} - C_{M}, \tag{1}$$

где C_c — стоимость выполнения основной боевой задачи существующим ЛА; $C_{\scriptscriptstyle M}$ — стоимость выполнения боевой задачи модернизированным ЛА.

Если в результате расчётов получится, что

- 9 < 0, то модернизация нецелесообразна;
- Э > 0, то модернизация целесообразна;
- $\Theta = 0$, то решение должно приниматься с учётом других факторов.

Стоимость выполнения боевой задачи можно определить следующим образом:

$$C = C_{\rm B} n_{\rm B}, \tag{2}$$

где $C_{_{\rm B}}$ — стоимость одного вылета на выполнение боевой задачи; $n_{\rm B}$ — количество вылетов (или необходимое количество ЛА, участвующих в выполнении боевой задачи).

Обозначим стоимость одного вылета существующим и модернизированным образцами как $C_{\text{в.с}}$ и $C_{\text{в.м}}$ соответственно. Тогда, используя выражение (2), получим:

$$\Theta = C_{B,C} n_{B,C} - C_{B,M} n_{B,M}.$$
 (3)

Проведение модернизации предполагает, что стоимость вылета возрастёт вследствие дополнительных затрат, связанных:

с проведением НИОКР (стоимость Сокр). По сложившейся практике эти дополнительные затраты должны покрываться, в основном, за счёт собственных средств предприятий-разработчиков, которые предлагают те или иные проекты модернизации;

с дополнительным технологическим оснащением производства (технологическая подготовка и освоение производства $C_{\text{осн}}$);

с изменением стоимости производства модернизированного ЛА по сравнению с существующим ($C_{пр.м} - C_{пр.c} = \Delta C_{пр.м}$);

с изменением затрат на эксплуатацию модернизированного образца по сравнению с существующим ($C_{_{9.M}}-C_{_{9.C}}$). Следовательно, можно записать:

$$C_{B.M} = C_{B.C} + \frac{C_{\Pi P.M} - C_{\Pi P.C}}{T_{\text{oct}}} t_{B} + \frac{C_{\text{okp}} + C_{\text{och}}}{NT_{\text{oct}}} t_{B} + \frac{C_{\text{o.M}} - C_{\text{o.C}}}{T_{\text{oct}}} t_{B},$$
(4)

где N — предполагаемое количество модернизированных ЛА; $t_{\rm B}$ — время полёта на выполнение боевой задачи; $T_{\rm oct}$ — средний остаток технического ресурса ЛА (для вновь созданных ЛА принимается назначенный ресурс).

Подставив (4) в (3), получим:

После преобразований для группировки затрат и эффекта потребителя модернизированного ЛА и затрат изготовителя — предприятия, выполняющего модернизацию, получим:

$$\Theta = n_{\text{B.M}} \left\{ C_{\text{B.M}} \left[\frac{n_{\text{B.C}}}{n_{\text{B.M}}} - 1 \right] - \frac{C_{\text{9.M}} - C_{\text{9.C}}}{T_{\text{oct}}} t_{\text{B}} \right\} - \left[-n_{\text{B.M}} \left[\frac{\Delta C_{\text{пр.M}}}{T_{\text{oct}}} t_{\text{B}} + \frac{C_{\text{окр}} + C_{\text{och}}}{N T_{\text{oct}}} t_{\text{B}} \right].$$
(5)

Обозначим составляющие полученной формулы (5) через $\Delta \Theta_{\text{потр}}$ и $\Delta \Theta_{\text{изг}}$, тогда

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_{\text{norp}} - \Delta \Theta_{\text{изг}}, \tag{6}$$

где $\Delta \Theta_{\text{потр}}$ — эффект "потребителя", в качестве которого выступает заказчик; $\Delta \Theta_{\text{изг}}$ — эффект "изготовителя", характеризующий расходы, осуществляемые в промышленности и связанные с проведением модернизации ЛА.

Таким образом, формула (1), выражающая разницу стоимости выполнения боевой задачи, преобразована в формулу (6), из которой видно, что в стоимостном выражении, эффект, получаемый в результате модернизации, тем выше, а значит целесообразнее, чем меньше расходы на проведение самой модернизации в необходимом объёме.

Возвращаясь к анализу принятия решения о модернизации существующего или строительстве нового парка модернизированных самолётов Ил-76МД, и учитывая, что степень прироста боевых свойств рассматриваемого АК в обоих вариантах модернизации одинакова, определяющим фактором в выборе варианта модернизации остаются меньшие финансовые затраты на её проведение. Причём по оценкам как зарубежных, так и наших специалистов "глубокая" модернизация, проведённая на любом существующем летательном аппарате в 2,5-3,0 раза дешевле выпуска нового модернизированного ЛА этого же типа.

Таким образом, рассмотренная методология подготовки и проведения экспертных оценок позволяет глубоко и объективно рассматривать и выдавать рекомендации, связанные с модернизацией ЛА ВТА, опираясь на которые ЛПР минимизирует риск принятия недостаточно аргументированного решения и повышает вероятность получения максимальной эффективности от предполагаемых материальных затрат. С этой целью ЛПР:

при подготовке решения должно опираться на экспертную оценку, проводимую по основной группе характеристик авиационной техники, по её основному предназначению;

при формировании группы экспертов необходимо учитывать их компетентность, определяющуюся структурой и весомостью аргументации и осведомлённостью в рассматриваемой области знаний.

Библиографические ссылки

- 1. Шибанов Г.П. Порядок формирования экспертных групп и проведение коллективной экспертизы // Информационные технологии, № 12. 2003. С. 19—22.
- 2. Платунов В.С. Методология системных военно-научных исследований авиационных комплексов. М.: Изд-во "Дельта", 2005. С. 191—193.
- 3. Экономика военного строительства: новая парадигма [под ред. Лавринова Г.А., Викулова С.Ф.] Ярославль: ООО ИПК "Литера", 2008. С. 354—358.