

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Дикусар В. В., Кошьяка М., Фигура А. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА	3
Николаев А. В., Эль-Салим С. З. К ПРОБЛЕМЕ МАКЕТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ	13
Николаев А. В., Эль-Салим С. З. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ АНАЛИЗА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ.....	19
Артамонов Д. В., Литвинов А. Н., Юрков Н. К. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ	28
Гришко А. К., Лысенко А. В., Кочегаров И. И. ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ.....	35
Лапшин Э. В., Семочкина И. Ю., Самаров В. В. КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ФУНКЦИЙ МНОГИХ АРГУМЕНТОВ	42

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Гасанов М. Г., Гардашов С. Г. ЧАСТОТНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КОММУТАТОРОВ...	49
Полтавский А. В., Буц В. П., Юрков Н. К. ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ.....	56
Дивеев А. И., Коньирбаев Н. Б. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГРУППЫ КВАДРОКОПТЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МОНИТОРИНГА ОБЛАСТИ	64
Быстров В. В., Маслобоев А. В., Путилов В. А. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКТНОГО МЕНЕДЖМЕНТА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ: ПОДХОД И ФОРМАЛЬНЫЙ АППАРАТ	73
Штыков Р. А. ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ КРУГЛОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИРОДНОГО И СЖИЖЕННОГО ГАЗОВ В ДИФфуЗИОННОМ ФАКЕЛЕ.....	85

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Северцев Н. А., Зацаринный А. А.

УЧЕТ СЛУЧАЙНОСТИ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТИ

В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОБОРОННЫХ

ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ..... 90

Казамбаев М. К., Куатов Б. Ж.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ

АППАРАТОВ 97

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

УДК 351.74.1

DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-1

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА¹

В. В. Дикусар, М. Кошьяк, А. Фигура

Введение

При входе космического летательного аппарата (КЛА) в атмосферу повышение надежности достигается за счет выбора формы КЛА, материала обшивки и геометрии оптимальной траектории. В этом случае должны выполняться определенные ограничения, наложенные на динамический режим полета.

В первую очередь эти ограничения относятся к аэродинамическим силам, действующим на КЛА. Если угол атаки на КЛА постоянный, а распределение коэффициента давления c_p на поверхности КЛА не изменяется или почти не изменяется в процессе полета, что характерно во многих случаях для гиперзвукового участка траектории, то ограничения $X < X_{\text{доп}}$ и $Y < Y_{\text{доп}}$, налагаемые на аэродинамические силы из условий прочности конструкции КЛА, сводятся к ограничению на величину скоростного напора

$$\frac{\rho V^2}{2} = q \leq q_{\text{доп}} = \min \left(\frac{X_{\text{доп}}}{c_x S}, \frac{Y_{\text{доп}}}{c_y S} \right). \quad (1)$$

Значения c_x и c_y при упомянутых предположениях практически постоянны. Масса КЛА при прочих равных условиях в данном случае играет второстепенную роль. Поскольку статические аэродинамические нагрузки уравниваются распределенными силами инерции, пропорциональными массовой плотности КЛА, то при пропорциональном изменении этой плотности условия нагрузки на конструкцию КЛА не изменяются, и некоторую роль может сыграть лишь перераспределение массовой плотности.

В том случае, когда на борту КЛА находится экипаж, важно обеспечить ограничения, наложенные на значения перегрузки, которой подвергаются члены экипажа. Перегрузка определяется отношением аэродинамической силы (включая и силу тяги, если КЛА снабжен двигательной установкой) к весу КЛА на Земле. Так, полная перегрузка равна

$$n = \frac{R}{mg_3}, \quad (2)$$

где R – суммарная аэродинамическая сила.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-07-08952).

Существенную роль играет и направление перегрузки. Если угол атаки КЛА практически постоянен и условия обтекания неизменны, то направление действия перегрузки определено, и условие $n \leq n_{\text{доп}}$ сводится к условию

$$\frac{q}{m} = \left(\frac{q}{m} \right)_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Процесс входа в атмосферу КЛА сопровождается интенсивным нагреванием. Обычно различают конвективные и радиационные тепловые потоки.

Максимальное значение $q_{\text{кл}}$ или $q_{\text{кт}}$, достигаемое в процессе полета, является одним из главных критериев, определяющих напряженность теплового режима на траектории входа в атмосферу. Другим не менее важным критерием является полное количество тепла, подводимое к данной точке КЛА во время спуска:

$$Q_{\text{кл}} = \int_{t_0}^T q_{\text{кл}} dt \quad (4)$$

или

$$Q_{\text{кт}} = \int_{t_0}^T q_{\text{кт}} dt,$$

здесь $q_{\text{кл}}$ – конвективный тепловой поток, подводимый к единице площади в единицу времени в случае ламинарного пограничного слоя, а $q_{\text{кт}}$ – соответствующая величина для турбулентного пограничного слоя.

Соответствующие оценки для указанных величин приведены в работе [1].

Требования о достижении минимума максимального значения q_K или минимума значения Q_K оказываются противоречивыми: в первом случае желательно, чтобы траектория входа в атмосферу была возможно более пологой, во втором случае – возможно более крутой.

Чтобы отдать предпочтение тому или иному критерию или найти разумный компромисс между ними, необходимо принять во внимание способ теплозащиты, применяемый для данного конкретного КЛА.

Если поверхность КЛА сделана из материала с очень высокой температурой плавления и большим коэффициентом черноты ε , то создается возможность отвода большей части количества тепла, поступающего к КЛА путем лучеиспускания с поверхности КЛА. Лучистый поток тепла, исходящий от нагретой до температуры T_w (по шкале Кельвина) поверхности КЛА, определяется формулой

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma T_w^4, \quad (5)$$

где $\varepsilon \leq 1$; $\sigma = 1,35 \cdot 10^{-11}$ ккал / (м² · с · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

При достаточно медленном нарастании теплового потока q_K или достаточно малой теплоемкости защитного слоя КЛА можно считать, что

$$q_{\text{изл}} \approx k q_K, \quad (6)$$

где k – коэффициент, близкий к единице (несколько меньше единицы). Равенство (6) позволяет оценить так называемую *равновесную* температуру данной точки поверхности КЛА

$$T_w \approx \sqrt[4]{\frac{k q_K}{\varepsilon \sigma}} \quad (7)$$

(во многих случаях для грубой оценки принимают $k = 1$).

Другой способ отвода тепла от КЛА предусматривает разрушение и унос (*абляцию*) части теплозащитного слоя. В этом случае нет необходимости стремиться к повышению температуры плавления материала теплозащитного слоя. При нагревании поверхности КЛА до температуры плавления начинается процесс абляции: материал поверхности плавится и или даже сублимирует из твердого состояния в газообразное. Начало и конец процесса абляции приближенно определяются условием

$$T_w = T_{абл}, \quad (8)$$

где $T_{абл}$ – температура, при которой начинается абляция поверхности. В этом случае значительная часть материала поверхности КЛА уносится в поток. Расчет общей массы разрушаемого теплозащитного покрытия достаточно сложен, поскольку при уносе массы возникает дополнительный *экранирующий эффект* и конвективный тепловой поток к КЛА уменьшается.

Для очень грубой сравнительной оценки напряженности тепловых режимов можно использовать следующую процедуру. Температура заданной точки поверхности КЛА считается равновесной, т.е. определяется из соотношения (7), если она не превышает температуры абляции $T_{абл}$. Если вычисленная равновесная температура в интервале времени (t_1, t_2) превышает $T_{абл}$, то температура поверхности принимается равной $T_{абл}$ и вычисляется интеграл

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} [q_K - q_{изл}(T_{абл})] dt. \quad (9)$$

Интересно отметить, что интеграл можно уменьшить до малых значений двумя кардинально различными путями. Первый из них связан с выбором возможно более крутой траектории входа в атмосферу и сокращением времени полета. Второй путь, напротив, предусматривает выбор возможно более пологой траектории входа, с тем, чтобы максимальная равновесная температура лишь ненамного превышала температуру плавления или вообще не достигла температуры плавления.

В случае, если разрушение поверхности КЛА неприемлемо, допустимыми являются только пологие траектории. При больших скоростях полета (порядка второй космической и выше) существенную или даже преобладающую роль приобретает радиационный тепловой поток $q_{РАД}$ от газа за скачком уплотнения, нагретого до высокой температуры, поступающий на поверхность носовой части тела.

Значение $q_{РАД}$ обычно аппроксимируют формулами типа

$$q_{РАД} = c_{РАД} r \rho^m V^n, \quad (10)$$

где значения $c_{РАД}$, m и n берутся различными для различных диапазонов изменения скорости: $m = 1,3 \div 1,8$; $n = 7 \div 20$. В отличие от конвективных тепловых потоков значение $q_{РАД}$ возрастает с ростом r , поскольку толщина слоя нагреваемого газа примерно пропорциональна r , где r – радиус сферической носовой части, ρ – плотность атмосферы.

Постановка задачи

Рассматривается задача о выборе угла атаки аппарата, тормозящегося в атмосфере при минимизации суммарного теплового потока с учетом ограничений на величину полной перегрузки скоростного напора (1). Решение указанных задач позволяет определить маневренные возможности аппарата [1].

Суммарное количество тепла определяется интегралом

$$q = \int_0^T C V^3 \rho^{1/2} dt \quad (11)$$

Требуется выбрать управление $C_y(t)$, доставляющее минимум $q(T)$ (11) при следующих ограничениях:

$$n_{\Sigma} = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} q \frac{S}{G} \leq N, \quad q = \frac{\rho V^2}{2}, \quad G = mg; \quad (12)$$

$$C_y^{\min} \leq C_y \leq C_y^{\max}, \quad C_x = C_{x_0} + kC_y^2; \quad (13)$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\beta H}, \quad g = g_0 \frac{R^2}{(R+H)^2}, \quad \dot{V} = -C_x q \frac{S}{m} - g \sin \theta; \quad (14)$$

$$\dot{\theta} = C_y q \frac{S}{mV} + \left(\frac{V}{R+H} - \frac{g}{V} \right) \cos \theta, \quad \dot{H} = V \sin \theta, \quad \dot{L} = \frac{RV \cos \theta}{R+H}, \quad (15)$$

где n_{Σ} – полная перегрузка; ρ – плотность атмосферы; V – скорость аппарата; θ – угол наклона траектории; H – высота полета; G – вес аппарата; m – масса; g – ускорение силы тяжести на поверхности планеты; R – радиус планеты; C_x – коэффициент лобового сопротивления; C_y – коэффициент подъемной силы; S – характерная площадь аппарата; C_{x_0} , k , ρ_0 , β , C , C_y^{\min} , C_y^{\max} , N – постоянные величины.

Для системы (11)–(15) заданы начальные условия

$$V(0) = V_0, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad H(0) = H_0, \quad L(0) = L_0, \quad q(0) = 0. \quad (16)$$

Граничные условия имеют вид

$$L(T) = a, \quad V(T) = V_1, \quad \theta(T) = \theta_1, \quad H(T) = H_1, \quad T \text{ – не фиксировано.} \quad (17)$$

где a – параметр.

Заметим, что ограничение (11) выполняется автоматически из условий (12), (13).

Принцип максимума (регулярный случай)

Пусть спускаемый аппарат приходит из начального состояния (16) в конечное положение (17) оптимальным образом в смысле минимума или максимума дальности в предположении, что на оптимальной траектории выполнено условие регулярности [2, 3]. В нашем случае условие регулярности эквивалентно условию

$$\frac{\partial n_{\Sigma}}{\partial C_y} \neq 0, \quad n_{\Sigma} = N. \quad (18)$$

В этом случае принцип максимума имеет следующий вид:

$$\Pi = P_{\theta} \theta^* + P_H H^* + P_V V^* + P_L L^*, \quad \Pi_1 = \Pi - \lambda(t) (n_{\Sigma} - N), \quad (19)$$

$$P_{\theta}^* = -\frac{\partial \Pi}{\partial \theta}, \quad P_V^* = -\frac{\partial \Pi}{\partial V}, \quad P_H^* = -\frac{\partial \Pi}{\partial H}, \quad P_L^* = -\frac{\partial \Pi}{\partial L}, \quad P_q^* = -\frac{\partial \Pi}{\partial q}, \quad (20)$$

здесь $\lambda(t)$ – множитель Лагранжа, который определяется из условия Бласса [2, 3]; Π – функция Понтрягина, Π_1 – функция Лагранжа:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C_y} - \lambda(t) \frac{\partial n_{\Sigma}}{\partial C_y} = 0, \quad (21)$$

P_0, P_V, P_H, P_L, P_q – соответствующие сопряженные переменные. Для ограничения типа неравенств (12) выполнено условие дополняющей нежесткости

$$\lambda(t)(n_{\Sigma} - N) = 0. \quad (22)$$

Так как система (11), (15) автономна и на время спуска никаких ограничений не накладывается, то функция Понтрягина (19) тождественно равна нулю, т.е.

$$\Pi(P, x, u) \equiv 0, \quad u = C_y, \quad x = (\theta, V, H_y, L), \quad P = (P_0, P_V, P_H, P_L, P_q). \quad (23)$$

Сопряженная переменная $P_q(t)$ нормируется условием

$$P_q(t) = -1. \quad (24)$$

Из $P_q^* = 0$ (20) следует $P_q(t) \equiv 1$ на всей оптимальной траектории.

Начальные условия для системы (20) неизвестны и являются параметрами задачи. Условия $P_q(t) \equiv -1$ и $\Pi(P, x, u) \equiv 0$ (2.6) по существу определяют три свободных параметра

$$P_0(0) = C_1, \quad P_V(0) = C_2, \quad P_L(0) = C_3 \quad (25)$$

так как $P_H(0)$ определяется из условия $\Pi(P, x, u) \equiv 0$.

В этом случае число контролируемых в конце траектории функций (17) совпадает с числом свободных параметров задачи (11)–(17), (19), (20), поскольку время T не фиксировано и является свободным параметром.

Согласно принципу максимума программа управления выбирается из условия

$$\Pi \rightarrow \max_{C_y}, \quad \text{при } q(T) \rightarrow \min. \quad (26)$$

Выпишем ту часть функции Понтрягина (19), которая явно зависит от управления $C_y(t)$

$$\Pi_0 = P_0 \frac{C_y \rho V S}{2m} - P_V \frac{C_x \rho V^2 S}{2m}. \quad (27)$$

Управление $C_y(t)$ может принимать не только концевые значения (13), но также и промежуточное, которое определяется из условия

$$\frac{\partial \Pi_0}{\partial C_y} = 0, \quad C_y^* = \frac{P_0}{2kP_V V}, \quad C_y^{\min} \leq C_y^* \leq C_y^{\max}. \quad (28)$$

Вычислим теперь три значения Π_0 (27)

$$\Pi_1 = \Pi_0(C_y^{\min}), \quad \Pi_2 = \Pi_0(C_y^{\max}), \quad \Pi_3 = \Pi_0(C_y^*)$$

и определим соответствующие минимальные и максимальные величины Π_0

$$\Pi_0^{\min} = \min\{\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3\}. \quad (29)$$

Соотношения (29) определяют характер оптимального управления для задачи Понтрягина, т.е. при условии $n_{\Sigma} < N$. Решение поставленной задачи значительно упрощается, если правый конец траектории контролируется условием

$$H(T) = H_1. \quad (30)$$

В этом случае решение краевой задачи (11), (17) определяется граничными условиями

$$\theta(T) = \theta_1, \quad V(T) = V_1, \quad L(T) = a \quad (31)$$

и зависит от трех произвольных постоянных C_1, C_2 и C_3 (25).

Таким образом, исходная задача сводится к трехпараметрической краевой задаче (11), (16), (20), (25), (31), а оптимальное управление $C_y(t)$ определяется в каждой точке t согласно принципу максимума (29).

Ограничение на перегрузку

Учет ограничений на перегрузку (12) существенно увеличивает трудности получения решения даже в регулярном случае. Первая проблема связана с вычислением множителя Лагранжа $\lambda(t)$ (21). При итеративном поиске оптимальной траектории наблюдается значительный рост множителей Лагранжа при $C_y(t) \rightarrow 0$. Указанную трудность можно преодолеть в рамках регуляризации или теории сингулярно-возмущенных систем.

Вторая проблема в задачах оптимального управления при наличии ограничений типа неравенств связана с определением геометрии оптимальной траектории или, другими словами, множества активных индексов. Этот вопрос в определенной степени решается для задач, линейных по управлению. При этом исходная задача дискретизуется и затем решается задача линейного программирования большой размерности. Ее решение дает возможность оценить геометрию оптимальной траектории. При этом сужается число возможных альтернатив в характере оптимальной траектории. На базе полученного решения можно построить гипотезу о геометрии оптимальной траектории. Затем оптимальную траекторию можно проверить на оптимальность, используя принцип максимума [2, 3].

Следует заметить, что при решении задачи линейного программирования также появляются серьезные проблемы вычислительного характера, связанные с некорректностью рассматриваемой задачи.

В поставленной задаче трудность определения геометрии оптимальной траектории связана с определением момента схода с ограничения $n_\Sigma = N$ (12).

Заметим, что суммарная перегрузка n_Σ (12) имеет две компоненты n_x и n_y . Первая называется продольной перегрузкой, а вторая – нормальной:

$$n_y = \frac{\rho V^2 S}{2mg_0} C_y, \quad n_x = \frac{\rho V^2 S}{2mg_0} C_x, \quad n_\Sigma = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}. \quad (32)$$

Вместо ограничения (12) введем новое ограничение

$$|n_y| + n_x \leq N_1, \quad |n_y| + n_x - N_1 = \phi(x, u) \leq 0. \quad (33)$$

При соответствующем выборе N_1 из справедливости неравенства (33) заведомо будет выполнено ограничение (12). Указанный факт следует из неравенства

$$N_1 \geq [|n_y| + |n_x|] \geq \sqrt{n_x^2 + n_y^2}, \quad (34)$$

причем равенство достигается при $C_y = 0$.

Вычислим теперь производную $\phi(x, u)$ (33) по C_y

$$\frac{\partial \phi}{\partial C_y} = \frac{\rho V^2 S}{2mg_0} [\text{sign} C_y + 2k C_y]. \quad (35)$$

В этом случае множитель Лагранжа $\lambda(t)$ для ограничения $\phi(x,u) \leq 0$ (33) определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{2\left(\frac{P_0}{2} - kP_V C_y V\right) g_0}{V[\text{sign}C_y + 2kC_y]} . \quad (36)$$

Необходимые условия экстремума в нерегулярном случае

Рассмотрим теперь случай, когда оптимальная траектория содержит интервал, где $n_\Sigma = N$, и на этом интервале в какой-нибудь точке $\frac{\partial n_\Sigma}{\partial C_y} = 0$.

Множество точек, определяемое уравнениями

$$\frac{\partial n_\Sigma}{\partial C_y} = 0, \quad n_\Sigma = N, \quad (37)$$

следуя работе [2], назовем **нерегулярными точками**. Для рассматриваемой задачи $\frac{\partial n_\Sigma}{\partial C_y} = 0$ при $C_y = 0$.

В нашем случае для решения поставленной задачи воспользуемся результатами работ А. Я. Дубовицкого и А. А. Милютина [2, 3].

Согласно [2, 3] при наличии нерегулярных точек система сопряженных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{P}_0 &= -\frac{\partial \Pi}{\partial \theta}, \\ \dot{P}_H &= -\frac{\partial \Pi}{\partial H} + \lambda(t) \frac{\partial n_\Sigma}{\partial H} + \frac{d\mu}{dt} \frac{\partial n_\Sigma}{\partial H}, \\ \dot{P}_V &= -\frac{\partial \Pi}{\partial V} + \lambda(t) \frac{\partial n_\Sigma}{\partial V} + \frac{d\mu}{dt} \frac{\partial n_\Sigma}{\partial V}, \\ \dot{P}_L &= 0, \\ \dot{P}_q &= 0, \end{aligned} \quad (38)$$

здесь $\lambda(t)$ – множитель Лагранжа; $\frac{d\mu}{dt}$ – обобщенная функция. Для указанных объектов выполнены условия дополняющей нежесткости

$$\lambda(t)(n_\Sigma - N) = 0, \quad C_y \frac{d\mu}{dt} = 0. \quad (39)$$

Случай, когда нерегулярная точка является концом траектории, не исключается.

Из (38) следует, что в нерегулярной точке (37) сопряженные переменные P_H и P_V будут испытывать скачок на величины $\mu \frac{\partial n_\Sigma}{\partial H}$ и $\mu \frac{\partial n_\Sigma}{\partial V}$ соответственно, причем $\mu > 0$. В этом состоит существенное отличие нерегулярного случая от регулярного, где сопряженные переменные являются непрерывными функциями для смешанных ограничений класса $\phi(x,u) \leq 0$ [2, 3].

Кроме условий (37)–(39), на оптимальной траектории должны быть выполнены условия интегрируемости множителей Лагранжа и условия нормировки (условия нетривиальности принципа максимума).

Регуляризация вырожденного принципа максимума

Одним из возможных способов построения оптимальной невырожденной траектории является изменение структуры ограничения (37). Ограничение вида (38) использовалось нами ранее для устойчивого итеративного поиска оптимальной траектории для малых значений $C_y(t)$. При этом множитель Лагранжа вычислялся по формуле (36). Изменение структуры смешанного ограничения (32) не накладывает дополнительных требований на функцию $P_\theta(t)$ в нерегулярной точке ($P_\theta(t_*) = 0$). Однако для продолжения траектории через точку t_* необходимо выполнить условие $q^*(t_*) = 0$. В результате мы получаем три условия на нерегулярной оптимальной траектории

$$q^*(t_*) = 0, \quad P_v(T) = 0, \quad P_\theta(T) = 0, \quad (40)$$

которые можно выполнить за счет выбора скачков сопряженных переменных и произвольных постоянных $P_v(0)$ и $P_\theta(0)$.

При таком подходе мы получаем невырожденный принцип максимума на всей оптимальной траектории.

Наличие нескольких нерегулярных точек также не приводит к вырождению принципа максимума, однако усложняет поиск оптимальной траектории.

Рассмотрим теперь другой подход к построению невырожденного принципа максимума. Для этой цели при построении функции Понтрягина (19) член $P_\theta \frac{C_y \rho V S}{2m}$ считаем малым параметром при достаточно малых $C_y(t)$. Тогда выражение для множителя Лагранжа $\lambda(t)$ принимает вид

$$\lambda(t) = -\frac{2kP_v}{1+2kC_x} g_0 \sqrt{C_x^2 + C_y^2}. \quad (41)$$

В этом случае условия интегрируемости $\lambda(t)$ выполняются автоматически.

В результате мы получаем невырожденный принцип максимума с нерегулярными точками. Кроме того, выражение (41) позволяет производить устойчивый итеративный поиск оптимальной траектории для малых $C_y(t)$.

Укажем еще один способ регуляризации вырожденного принципа максимума. Пусть на оптимальной траектории выполнено условие $n_\Sigma = N$ (12), тогда имеем

$$\frac{1}{2} \ln(C_x^2 + C_y^2) + \ln \frac{\rho V^2 S}{2mg_0} = \ln N. \quad (42)$$

Рассмотрим теперь отдельно члены (42), которые связаны с управлением

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \ln(C_x^2 + C_y^2) &= \ln \left[(C_x + C_y)^2 - 2C_y C_x \right] = \frac{1}{2} \ln(C_x + C_y)^2 \left[1 - \frac{2C_y C_x}{(C_y + C_x)^2} \right] = \\ &= \ln(C_x + C_y) + \frac{1}{2} \ln \left[1 - \frac{2C_y C_x}{(C_y + C_x)^2} \right]. \end{aligned} \quad (43)$$

Полученные выражения не имеют особенностей при $C_y = 0$. Последнее означает, что в этом случае множитель Лагранжа $\lambda(t)$ для ограничения (42) будет конечным. Таким образом, нерегулярная точка не накладывает никаких ограничений на сопряженную переменную $P_\theta(t)$. В результате получаем невырожденный принцип максимума.

Трехточечная краевая задача решается при фиксированном значении параметра a . При этом границы изменения параметра определяются из решения задач на минимум и максимум дальности [10]. Далее выбираем его значение из условия минимума максимального значения функционала (11).

Задача на первом этапе решалась методом продолжения решений по параметру [7]. Для прогноза последующих приближений к решению использовались методы восстановления зависимостей по накопленной информации [11]. Проводились параллельные вычисления [4, 5, 8] по всем параметрам задачи с использованием метода Соболя – Статникова [9, 12].

Библиографический список

1. Ярошевский, В. А. Вход в атмосферу космических летательных аппаратов / В. А. Ярошевский. – М. : Наука, 1988. – 116 с.
2. Афанасьев, А. П. Необходимое условие в принципе максимума / А. П. Афанасьев, В. В. Дикусар, А. А. Милютин, С. В. Чуканов. – М. : Наука, 1990. – 235 с.
3. Дикусар, В. В. Количественные и качественные методы в принципе максимума / В. В. Дикусар, А. А. Милютин. – М. : Наука, 1989. – 168 с.
4. Гаранжа, В. А. Параллельная реализация метода Ньютона для решения больших задач линейного программирования / В. А. Гаранжа, А. И. Голиков, Ю. Г. Евтушенко, М. Х. Нгуен // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2009. – Т. 49, № 8. – С. 1369–1384.
5. Deuffhard, P. Newton methods for nonlinear problems. Affine invariance adaptive algorithms / P. Deuffhard // Springer series in computational mathematics. – 2010. – № 35. – P. 324–328.
6. Арутюнов, А. В. Условия экстремума. Анормальные и вырожденные задачи / А. В. Арутюнов. – М. : Факториал, 1997. – 357 с.
7. Дикусар, В. В. Продолжение решений в прикладных задач оптимального управления / В. В. Дикусар, М. Кошья, А. Фигура. – И. : МФТИ, 2001. – 69 с.
8. Дикусар, В. В. Минимизация конвективного и радиационного теплового потока при входе аппарата в атмосферу / В. В. Дикусар, Н. Н. Оленев // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах : материалы XIII Всерос. конф. (Н. Новгород, 14–16 ноября 2013 г.) / под ред. проф. В. П. Гергеля. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. – С. 108–113.
9. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – М. : Наука, 1981. – 111 с.
10. Дикусар, В. В. Оптимизация дальности полета аппарата в атмосфере с учетом ограничений / В. В. Дикусар, А. А. Шилов // Труды 4-х чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. – М. : Наука, 1970. – 8 с.
11. Дикусар, В. В. Кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка с автоматическим обнаружением узлов / В. В. Дикусар // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 3. – С. 31–48.
12. Дикусар, В. В. Билинейные системы оптимального управления / В. В. Дикусар, М. Кошья, А. Фигура // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 3–10.

Дикусар Василий Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
отдела безопасности и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление» РАН
(Вычислительный центр им. А. А. Дородницына
Российской академии наук),
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: dikussar@yandex.ru

Кошья Марьян

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой информатики и математики,
Технологическо-гуманитарный университет
им. Казимера Пулаского
(26600, Польша, Радом, ул. Мальчевского, 29)
E-mail: km@pr.radom.pl

Dikusar Vasily Vasilevich

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
chief researcher of department of security
and non-linear analysis,
Federal Research Center for computer science and man-
agement» of the Russian Academy of Sciences
(Computing center named after A. A. Dorodnitsyn
of Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Koshka Marjan

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
head of sub-department of computer science
and mathematics,
Kazimierz Pulaski University
of Technologies and Humanities,
(26600, 29 Mal'chevskogo street, Radom, Poland)

Фигура Адам

доктор физико-математических наук, профессор,
декан факультета математики и информатики,
Технологического-гуманитарного университета
им. Казимиера Пулаского
(26600, Польша, Радом, ул. Мальчевского, 29)
E-mail: ad.figura@vp.pl

Figura Adam

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
dean of faculty of mathematics and Informatics, Kazimierz Pulaski University
of Technologies and Humanities,
(26600, 29 Mal'chevskogo street, Radom, Poland)

Аннотация. Проведено численное исследование оптимального спуска летательного аппарата с учетом ограничений. Основной целью оптимизации является минимизация максимальной температуры поверхности аппарата. Рассматривается задача о выборе угла атаки аппарата, тормозящегося в атмосфере при минимизации суммарного теплового потока с учетом ограничений на величину полной перегрузки скоростного напора. Задача решается на основе принципа максимума (регулярный случай) с учетом ограничений на перегрузку. Приведены необходимые условия экстремума в нерегулярном случае, когда оптимальная траектория содержит интервал. Осуществлена регуляризация вырожденного принципа максимума с помощью изменения структуры ограничений. Доказано, что взаимодействие различных методов решения важно для успешного рассмотрения такой задачи с большим количеством ограничений. Уменьшение температуры поверхности является значительным. Кроме того, максимальный тепловой поток и суммарный тепловой поток также можно значительно уменьшить путем оптимального выбора траектории движения. Предлагается двухэтапный метод решения задачи оптимального управления. На первом этапе определяется геометрия оптимальной траектории путем дискретизации системы обыкновенных дифференциальных уравнений и решения несобственной задачи нелинейного программирования большой размерности. На втором этапе проверяется справедливость принципа максимума для полученного решения. Для решения всех задач используются методы факторного анализа, продолжения решений по параметрам, восстановление зависимостей и прогноз последующих приближений.

Ключевые слова: надежность, нелинейное программирование, принцип максимума, параллельные вычисления, минимум максимального нагрева.

Abstract. This work presents a numerical study of optimal reentry body descent with constraints. The main purpose of optimization is to minimize the maximum surface temperature of the spacecraft. We consider the problem of choosing the angle of attack of the apparatus, which is retarded in the atmosphere while minimizing the total heat flux, taking into account the limitations on the total overload of the high-speed head. The problem is solved on the basis of the maximum principle (regular case), taking into account the restrictions on overload. Necessary conditions for an extremum are given in the irregular case when the optimal trajectory contains an interval. The degenerate maximum principle is regularized by changing the structure of the constraints. It is proved that the interaction of various methods is critical for the successful consideration of this problem with a lot of restrictions. The decrease in surface temperature is significant. In addition, the maximum heat flux and total heat flux can be significantly reduced by optimal choice of the trajectory. We propose a two-stage method for solving optimal control problems. In the first stage we determine the geometry of the optimal trajectory by use the discrete system of ordinary differential equations and solving the improper task of nonlinear programming of high dimension. The second step tests the validity of the maximum principle for the solutions obtained. To solve all problems we use methods of factor analysis, continuation of solutions on parameters, recovery dependencies, and the forecast for the next approximations.

Key words: reliability, nonlinear programming, maximum principle, parallel computing, minimum of maximum heating.

УДК 351.74.1

Дикусар, В. В.

Методы повышения надежности спускаемого аппарата / В. В. Дикусар, М. Кошьяка, А. Фигура // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 3–12. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-1.

К ПРОБЛЕМЕ МАКЕТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ

А. В. Николаев, С. З. Эль-Салим

Полупроводниковые газочувствительные сенсоры (ПГЧС) в области газового анализа применяются уже более 30 лет. В настоящее время разными лабораториями проводятся исследования по расширению области применения ПГЧС и построению систем для обнаружения и определения концентраций химически опасных веществ в воздухе. Разработаны приборы, системы, в той или иной степени удовлетворяющие требованиям, предъявляемым сегодня к газовому анализу [1].

Любой аналитический метод контроля, связанный с динамическими измерениями, содержит ряд объективных проблем, из которых явно выделяются основные: чувствительность, селективность и стабильность. Проблемы объединены в задачу «трех S»: *sensitivity* (чувствительность), *stability* (стабильность), *selectivity* (избирательность), решение которой требует системного подхода на схемотехническом уровне, совершенствования математического аппарата алгоритма работы и повышения качества технологии изготовления сенсоров [2].

Проблема обнаружения и определения паров компонентов ракетных топлив (КРТ) обусловлена их высокой реакционной способностью, принципиально различными химическими свойствами и высоким статусом химической опасности. Так, например, тетраоксид азота (АТ) – амил – является сильным окислителем, в то же время несимметричный диметилгидразин (НДМГ) – гептил – активным восстановителем, класс опасности для гептила – I, для паров тетраоксида азота – II (III) [3, 4].

Сегодня основным методом контроля паров КРТ является индикационное обнаружение с полуколичественным расчетом концентрации примеси. В этом методе через ленту, пропитанную хромофорным реагентом, пропускают поток воздуха, содержащий ту или иную примесь паров КРТ. При взаимодействии с реагентом образуется окрашенное пятно, интенсивность окраски которого зависит от концентрации определяемой примеси. Интенсивность окраски пятна определяется методом спектроскопии диффузного рассеяния при угле отбора излучения, соответствующем максимуму индикатрисы рассеяния. Для каждого типа примеси применяется уникальная лента с выбранным хромофорным реагентом. Метод предполагает использование расходных материалов (их хранение, замена), является индикаторным (погрешность определения концентраций выше 40–50 %) [5].

Для обнаружения паров КРТ в воздухе авторами предложен метод контроля на основе полупроводниковых газочувствительных сенсоров, изготовленных из нанодисперсного диоксида олова, обогащенного сурьмой и легированного металлами – катализаторами Pd, Mn, Ag, Co, Cd, Se и другими металлами и их оксидами [6, 7].

Сенсоры, применяемые для определения паров КРТ, имеют многослойную структуру: газочувствительный слой, подложка-диэлектрик, нагревательный элемент и контактные площадки (рис. 1). Электрические соединения осуществляются через контактные площадки, изготовленные из золотосодержащей проводящей пасты, соединения выполнены из Au-провода диаметром 37–40 мкм [8].

Принцип работы ПГЧС основан на измерении изменения электропроводности полупроводника при хемосорбции молекул из газовой фазы при заданной температуре. Внедренные в кристаллическую структуру металлы-катализаторы промотируют процесс адсорбции, избирательно ускоряя химическую реакцию, протекающую в гетерогенной зоне «газовая фаза – поверхность». Изменение электропроводности происходит вследствие перехода электронов из гетерогенной зоны в зону проводимости, тем самым изменяя ток в цепи включения сенсора [9].

Основу газочувствительного слоя составляет диоксид олова – полупроводник, обладающий широкой запрещенной зоной и проводимостью *n*-типа. Концентрация носителей заряда в зоне проводимости и в поверхностной области зависит от температуры нагрева, которая определяет ширину запрещенной зоны [9, 10].

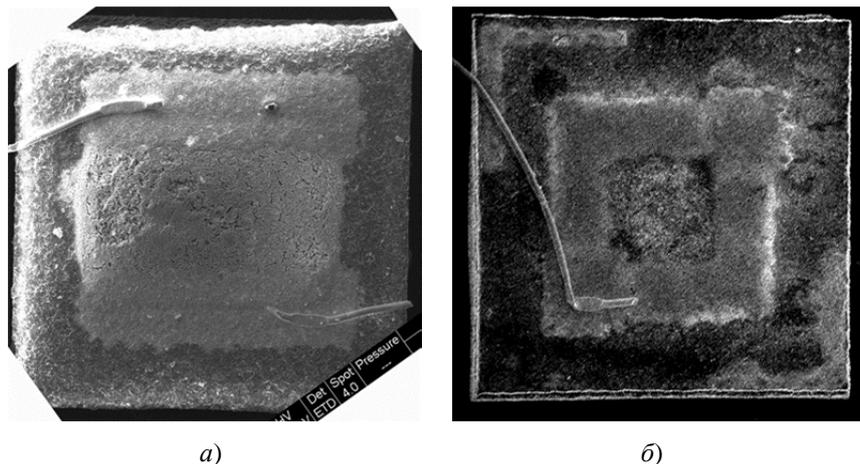


Рис. 1. Растровые изображения газочувствительного слоя (а) и нагревательного элемента (б) полупроводникового сенсора

Тестирование газочувствительных элементов проведено на основе алгоритма их функционирования, который определен физическим принципом работы полупроводника в режиме активированной адсорбции (рис. 2). Алгоритм включает следующие основные этапы работы:

- подготовка поверхности к хемосорбции (газочувствительный материал нагревается до температуры 800–850 °С, и преобладающим процессом является десорбция);
- контроль состояния чувствительного слоя (ЧС), при этом мощность нагрева снижается до минимального значения (0–10 мВт). Контроль состояния осуществляется сравнением сопротивления ЧС со значениями, заданными технологически;
- выход в рабочий режим при установленной мощности нагрева от 50 до 500 мВт;
- режим аналитического контроля в течение установленного времени экспозиции [10].

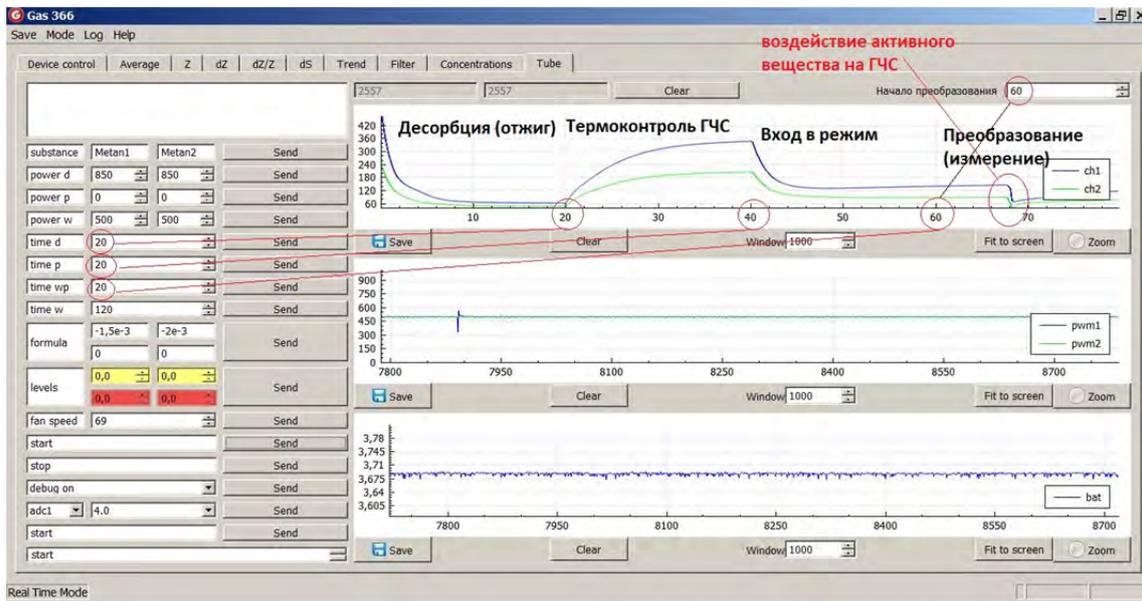
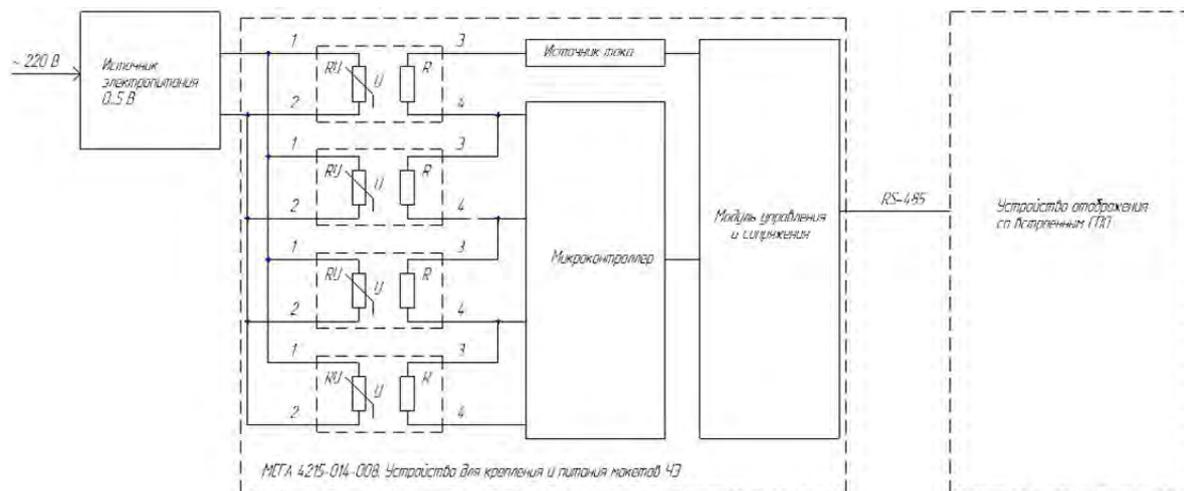


Рис. 2. Этапы алгоритма работы газочувствительных сенсоров

Измерение аналитического отклика ГЧС проводится по схеме, приведенной на рис. 3. Сенсоры установлены в цепи нагрева и измерения потенциала, соответствующего изменению сопротивления при воздействии паров КРТ. С помощью источника питания подается ток, соответствующий температуре нагрева, необходимой для обнаружения паров НДМГ и АТ. Измеренное за время экспозиции напряжение сенсора оцифровывается для дальнейшей обработки с помощью программного обеспечения, позволяющего рассчитать аналитический сигнал, соответствующий концентрациям целевых веществ – НДМГ и АТ [11].

Управление работы системы сенсоров и обработка аналитического сигнала проведены в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. Обмен между микроконтроллером и персональным компьютером осуществлен через интерфейс RS-485.



а)



б)



в)

Рис. 3. Система газочувствительных сенсоров: а – схема измерения индикационного эффекта изменения сопротивления при воздействии паров КРТ; б – электронный макет; в – чувствительный элемент

Проверка ГЧС проведена с парами гептила с концентрацией 7 мг/м^3 и с парами амила с концентрацией $9,8 \text{ мг/м}^3$. Пробы воздуха с примесями НДМГ и АТ поданы с помощью газодинамических установок (рис. 4), расход потока – 1000 мл/мин.



а)



б)

Рис. 4. Газодинамические установки для генерации паров гептила и амила: а – комплекс газодинамический ГДК-045; б – генератор газовых смесей 655 ГР 05

На рис. 5 приведены измерения по алгоритму определения паров КРТ при мощностях нагрева 150 мВт для амила и 400 мВт для гептила и тренд долговременных измерений для определения стабильности индикационного эффекта.

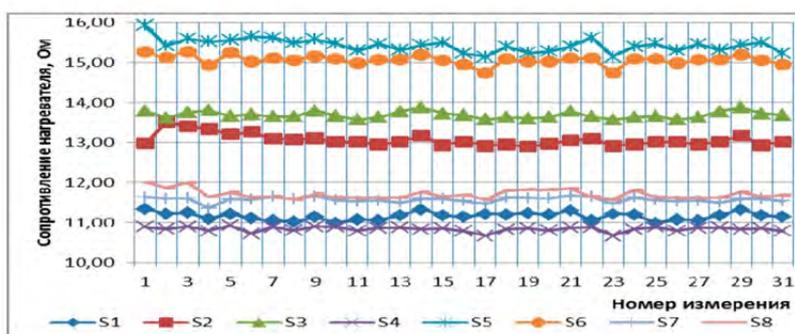
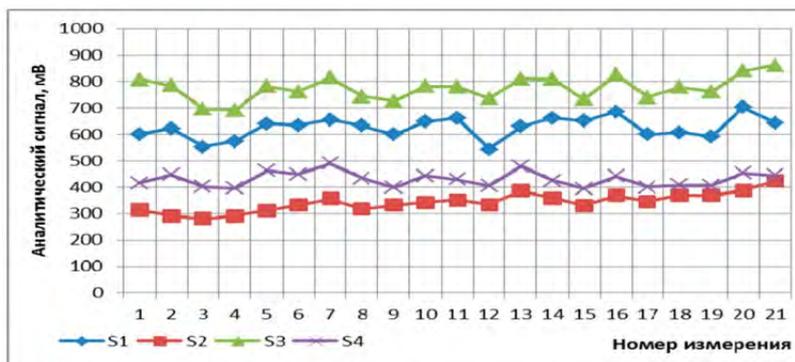
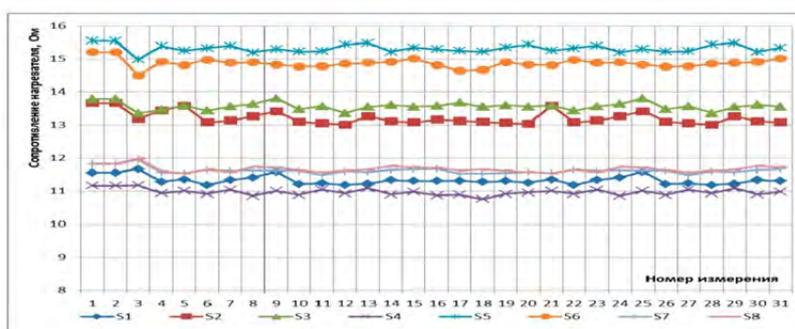
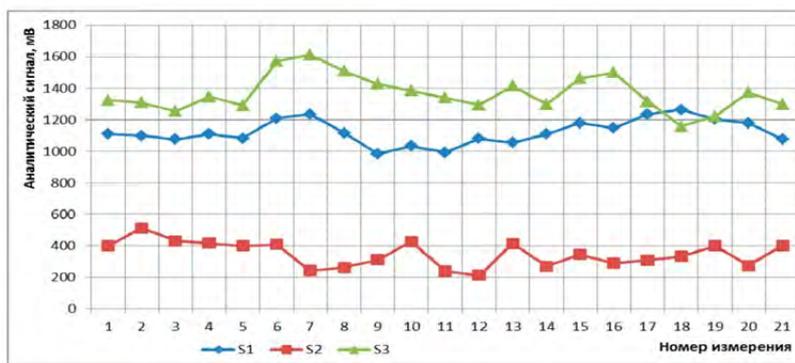


Рис. 5. Результаты измерений НДМГ и АТ: единичные измерения, многократные измерения, сопротивление нагревательного элемента

При хемосорбции тетраоксида азота электропроводность полупроводникового сенсора с проводимостью *n*-типа уменьшается (соответственно растет омическое сопротивление), что соответствует веществу – акцептору, при адсорбции НДМГ – электропроводность растет, т.е. омическое сопротивление уменьшается, что соответствует веществу – донору. На рис. 5 видно, что ки-

нетика изменения потенциала при хемосорбции НДМГ отличается от кинетики паров АТ. Если в случае хемосорбции НДМГ изотерма имеет вид Ленгмюра, то в случае АТ вид изотермы соответствует изотерме Генри [11].

Стабильность нагревательного элемента (отклонение от технологического параметра для каждого элемента не превышает 5 %) и стабильность индикационного эффекта (отклонение от среднего значения не превышает 20 %) позволяют судить о правильно выбранной технологии изготовления газочувствительных сенсоров. Действительно, для активного окислителя (АТ) и сильного основания (НДМГ) влияние среды и условия измерений не меняют электрофизических и аналитических характеристик полупроводниковых газочувствительных сенсоров. При незначительной доработке технологии, расширении перечня легирующих примесей газочувствительные сенсоры могут быть использованы для проектирования датчиков-газоанализаторов (ДГА), отвечающих современным требованиям газового анализа:

- универсальность – возможность определения концентраций различных химических веществ без замены ПА ГЧС;
- чувствительность на уровне до сотых долей объемных процентов;
- возможность автономной и централизованной работы;
- применение протоколов информационно-логического обмена ДГА с управляющим блоком либо другими ДГА;
- модульное построение конструкции;
- малые габариты и масса, низкое энергопотребление.

Библиографический список

1. Белозерцев, А. И. Причинно-следственный подход к моделированию надежности системы «газовая фаза – полупроводник» / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 3–9.
2. Белозерцев, А. И. Эмпирическая модель идентификации вещества многокомпонентных парогазовых смесей / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 10–17.
3. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях / И. Я. Мясников, В. Я. Сухарев, Л. Ю. Куприялов, С. А. Завьялов. – М. : Наука, 1991. – 327 с.
4. Зрелов, В. Н. Жидкие ракетные топлива / В. Н. Зрелов, Е. П. Серегин. – М. : Химия, 1975. – 320 с.
5. Штехер, М. С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей / М. С. Штехер. – М. : Машиностроение, 1976. – 304 с.
6. Клещенко, Р. В. Некоторые вопросы развития, применения и производства металлоксидных полупроводников / Р. В. Клещенко, А. А. Чистяков, С. З. Эль-Салим // Записки Горного института. – 2007. – Т. 173. – С. 153–155.
7. Антоненко, В. А. Полупроводниковые газовые сенсоры / В. А. Антоненко, А. А. Васильев, И. В. Олихов. – М. : ЦНИИ «Электроника», 2001. – 28 с.
8. Черемисина, О. В. Получение нанодисперсного диоксида олова методом химического осаждения / О. В. Черемисина, С. З. Эль-Салим // Аналитические приборы : материалы конф. – СПб., 2006. – С. 123–137.
9. Синтез полупроводниковых материалов на основе нанодисперсного диоксида олова для изготовления газочувствительного слоя адсорбционных датчиков : отчет о работе / ОФХ СПГИ (ТУ) ; рук. С. З. Эль-Салим. – СПб., 2008. – 15 с.
10. Клещенко, Р. В. Физико-химическое обоснование и разработка способа получения полупроводниковых оксидов переходных металлов / Р. В. Клещенко, О. В. Черемисина, С. З. Эль-Салим // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 87, вып. 4. – С. 244–249.
11. Кинетика адсорбции паров фосфорорганических соединений на поверхности оксида цинка / Р. В. Клещенко, О. В. Черемисина, В. Г. Родин, С. З. Эль-Салим // Записки Горного института. – 2007. – Т. 170. – С. 180–183.

Николаев Андрей Валерьевич

генеральный директор,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: info@niifi.ru

Nikolaev Andrey Valer'evich

director general,
 Scientific Research Institute for Physical Measurements
 (440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Эль-Салим Суад Зухер

доктор физико-математических наук, профессор,
генеральный директор,
ООО «Омега»
(199048, Россия, г. Санкт-Петербург,
наб. реки Смоленки, д.19-21, лит. В)
E-mail: suad-olka@yandex.ru

Al-Salim Suad Zuher

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
director general,
Ltd «Omega»
(199048, lit. In, 19-21 embankment
of the Smolenka river, Saint-Petersburg, Russia)

Аннотация. Проведен поиск оптимальных методов измерения паров компонентов ракетного топлива: азотный тетраоксид N_2O_4 (АТ, амил по ГОСТ В 17656-72) и несимметричный диметилгидразин $(CH_3)_2N_2H_2$ (НДМГ, гептил по ГОСТ В 17803-72), удовлетворяющих требованиям газового анализа специальных объектов. Выбран метод применения полупроводниковых сенсоров в качестве первичных преобразователей, обеспечивающий необходимую чувствительность, стабильность и селективность. Оптимизировано проектирование, позволяющее на базе полупроводникового газочувствительного сенсора создать унифицированный мультисенсорный датчик-газоанализатор, позволяющий измерять целевые вещества в сложных парогазовых смесях.

Ключевые слова: азотный тетраоксид, амил, несимметричный диметилгидразин, гептил, полупроводниковый газочувствительный сенсор, унифицированный мультисенсорный датчик-газоанализатор.

Abstract. Search of optimum methods of measurement of vapors of the components of rocket fuel is carried out: nitric N_2O_4 (AT) and asymmetrical dimethyl hydrazine $(CH_3)_2N_2H_2$ (ADMH) meeting requirements of the gas analysis of special objects. The method of application of semiconductor sensors as primary converters providing necessary sensitivity, stability and selectivity is chosen. The design allowing on the basis of a semiconductor gas-sensitive sensor is optimized sensors to create the unified multitouch sensor gas analyzer allowing to measure target substances in complex steam-gas mixes.

Key words: a semiconductor gas-sensitive sensor, the unified multitouch sensor gas analyzer.

УДК 681.586.72

Николаев, А. В.

К проблеме макетирования полупроводниковых газочувствительных сенсоров / А. В. Николаев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 13–18. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-2.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ АНАЛИЗА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

А. В. Николаев, С. З. Эль-Салим

Любой аналитический метод контроля, связанный с динамическими измерениями, содержит ряд объективных проблем, из которых можно выделить три основных – чувствительность, селективность и стабильность – как физической основы метода анализа, так и его методической реализации [1, 2].

Указанные проблемы объединяются в задачу «трех S» – sensitivity, stability, selectivity. Активно развиваемый нами адсорбционно-кинетический метод газового анализа основан на применении газочувствительных сенсоров, изготовленных из материала с полупроводниковыми свойствами. Применяемая технология синтеза позволяет получать материал с низкой дисперсией как по элементному, так и по фазовому составу.

При создании алгоритма работы прибора или аналитической системы необходимо учитывать интеграцию технических средств (схмотехнических решений), программного обеспечения и алгоритмического обеспечения [3].

В общем случае аналитический сигнал можно представить в виде суперпозиции некоторых модельных функций $\psi(t, X_i, P_j) = \sum c_i \psi_i$.

Выбор модели обусловлен физическим процессом, отвечающим за аналитические измерения. Если поток данных большой и к нему можно применить теорему больших чисел, то целесообразно в качестве моделей принять функционалы Гаусса и в отдельных случаях – Лоренца, которые имеют следующий канонический вид:

- функционал Гаусса $f(t, X, \lambda) = A(X, \lambda) \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right]$;
- функционал Лоренца $f(t, X, \lambda) = A(X, \lambda) \frac{\phi(\lambda)\varphi(X)}{1+n\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2}$.

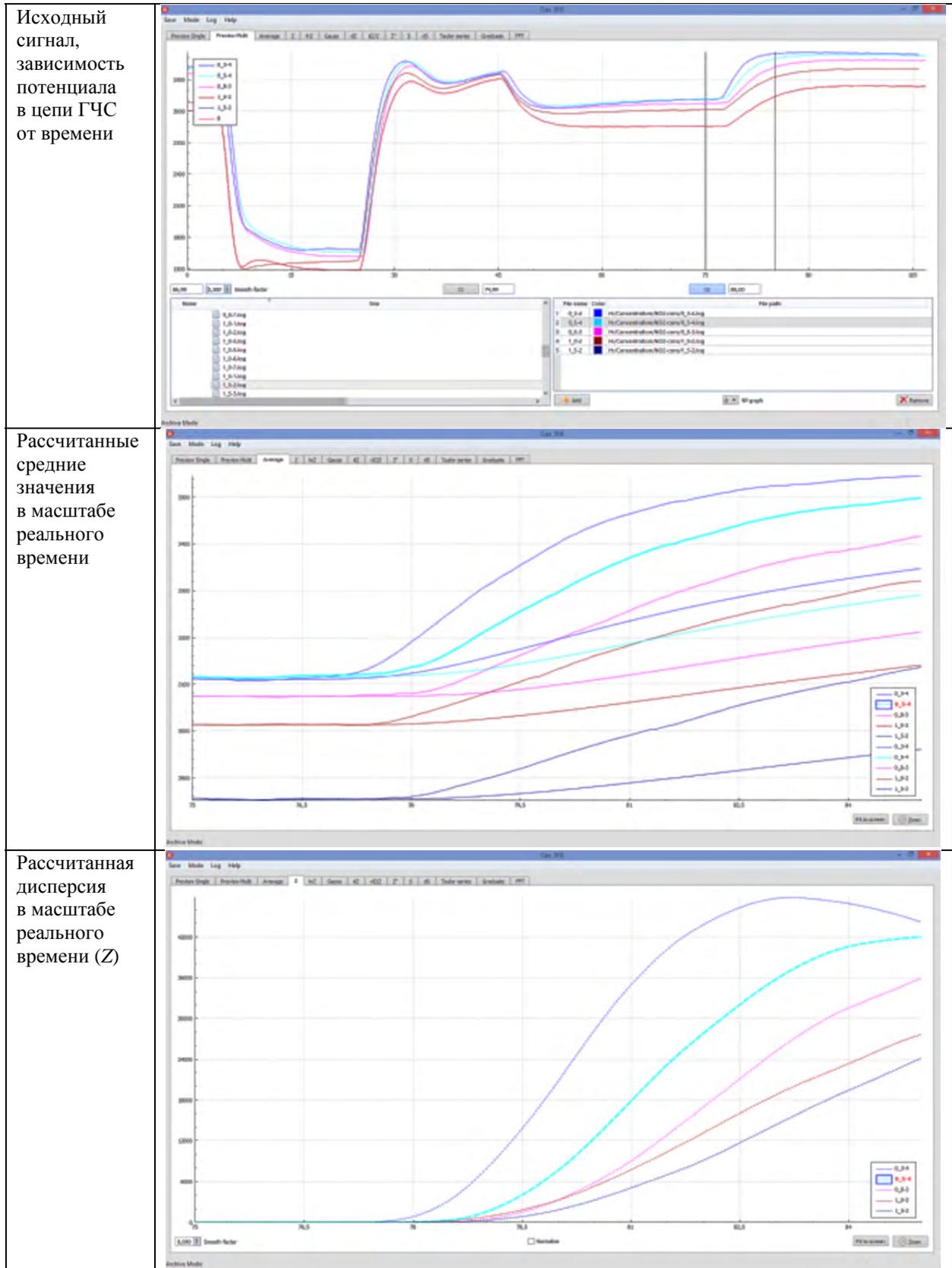
В приведенных уравнениях $A(X, \lambda)$, $\phi(\lambda)$, $\varphi(X)$ – экстенсивные параметры, задаваемые начальными условиями. Квазидетерминированные величины определяют пространства, к которым принадлежат измеренные данные. В общем виде $X \in \mathbb{R}$, $\lambda \in \mathbb{R}$, тем самым определяя пространство принимаемых значений для функционалов – $f(t, X, \lambda) \in \mathbb{R}$ или \mathbb{R}^2 . Следует отметить, что в ряде случаев полезно перейти в комплекснозначную область, т.е. $f(t, X, \lambda) \in \mathbb{C}$, что значительно расширяет область моделирующих функций [4, 5].

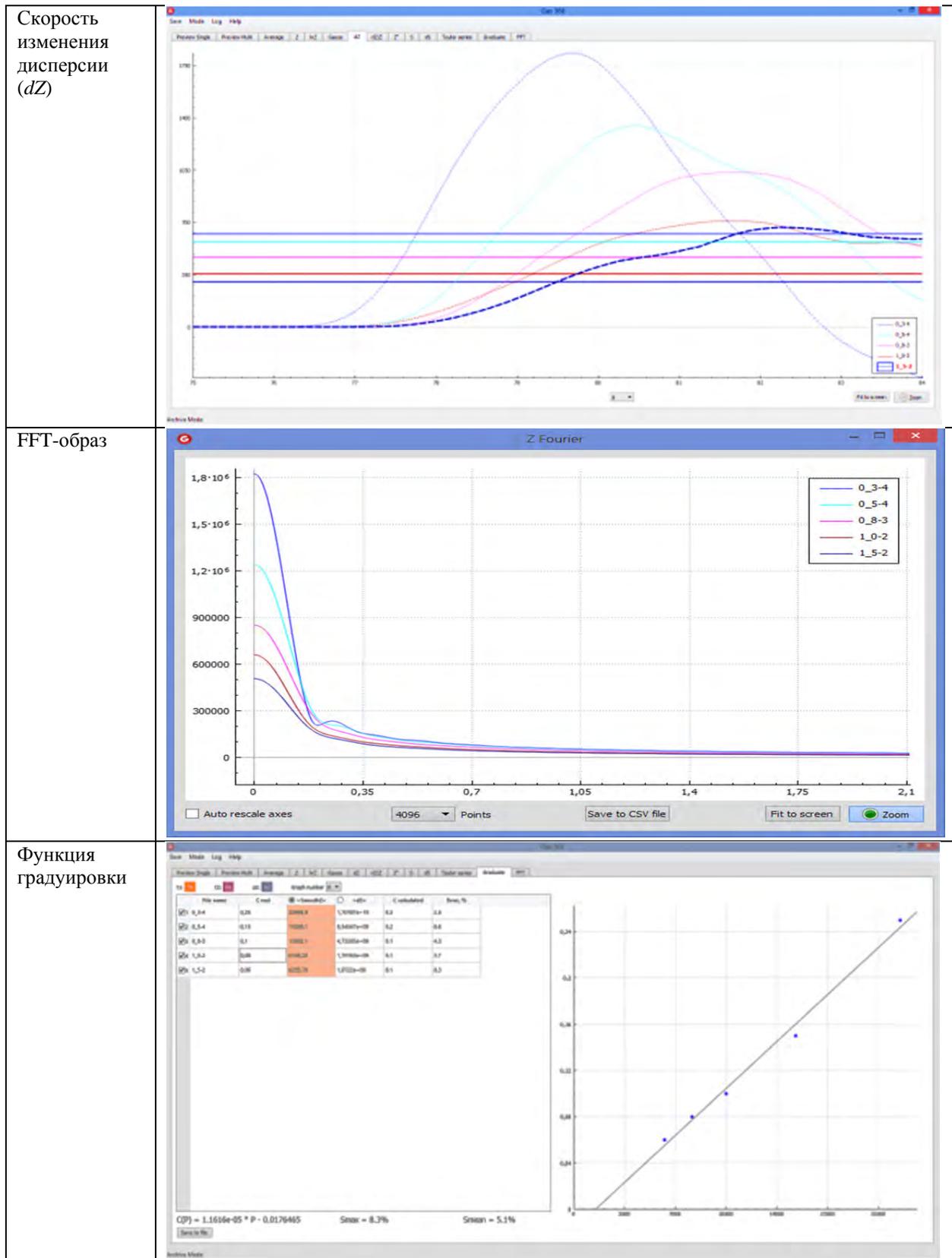
Как правило, в исходном – «чистом» виде использовать аналитический сигнал нельзя. В аналитических измерениях с применением химических или физических первичных преобразователей измеряемые значения являются косвенными, зависящими в той или иной степени от типа трансдюсеров (сенсоров, датчиков), схмотехнических решений их включения и других параметров.

Целесообразно аналитический сигнал или значения, полученные после первичных аппаратных преобразований, охарактеризовать обобщенными величинами, такими как энергия, мощность, статистические моменты или другие производные параметры, к которым следует отнести корреляционные и автокорреляционные функционалы, функции спектральной плотности и др. Введение обобщенных координат позволяет использовать формализм Гамильтона и вместо производных по времени перейти к операторам первого и второго порядков [6]. Кроме того, обобщенные координаты – функционалы – значительно расширяют пространство аналитических событий – от множества рациональных чисел \mathbb{R} , \mathbb{R}^2 и \mathbb{C} до многомерных векторных величин, подчиняющихся теории поля и развитому математическому аппарату (табл. 1).

Таблица 1

Преобразование исходного сигнала при обнаружении паров амила в диапазоне концентраций 0,05–0,25 мг/м³





Процесс первичной обработки представляется в виде ряда процедур, составляющих алгоритм, в который можно включить операции, недоступные значениям, принадлежащим пространству рациональных чисел. К таким операциям относятся процедуры фильтрации данных, коррек-

тировки базовой линии, шумоподавления, предварительной статистической оценки измеряемых параметров. Это требует тщательного выбора весовых функций линейных операторов над полем обобщенных значений.

Рассмотрим некоторые понятия, определяющие пространство обобщенных значений.

Мгновенная мощность: $P(t) = f^2(t)$. В общем случае мгновенная мощность не аддитивна, т.е. $(\sum f_i(t))^2 \neq \sum f_i^2(t)$.

Энергия сигнала для интервала $t_1 < t < t_2$ $E = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt$, соответственно, средняя мощность

за интервал времени измерения $E_{md} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt$ [5].

Помимо количественных характеристик финитных аналитических сигналов, существуют параметры, аналогичные статистическим моментам величин, имеющих нормальное (гауссово) распределение.

Нулевой момент определяется как $m_0 = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt$. Отсюда формируются моменты старших порядков: $m_n = \frac{1}{m_0} \int_{-\infty}^{\infty} t^n f(t) dt$. Момент первого порядка соответствует математическому ожиданию $m_1 = \frac{1}{m_0} \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt$, отсюда формируются центральные моменты – симметричные относительно начала координат:

$$M_n = \frac{1}{m_0} \int_{-\infty}^{\infty} (t - m_1)^n f(t) dt.$$

Аналитическая система может быть полной лишь тогда, когда она наделена свойством эргодичности и обратимостью во времени. Тогда для функций, описывающих (моделирующих) аналитические сигналы, существуют интегралы свертки [8]:

$$S_{ij}(t) = \int_{t_1}^{t_2} f_i(t) f_j(t - \tau) dt.$$

Корреляционные интегралы:

– корреляционный: $K_{fg}(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) g(t - \tau) dt$;

– автокорреляционный: $K_{ff}(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) f(t - \tau) dt$.

Сложный аналитический сигнал целесообразно разложить в спектр по частотам – (переменным) параметрам, обратным времени. Дискретность и непрерывность спектра определяются соответствующей дискретностью и непрерывностью аналитического сигнала. При достаточно малом $\Delta t \rightarrow 0$ дискретный спектр хорошо описывается непрерывными функциями.

Аналитический сигнал $f(t)$ может быть представлен некоторым спектром $F(k)$ в базисе образующих функций $\varphi_k(t)$, если существует равенство $f(t) = \sum_k F[k] \varphi_k(t)$, при этом спектр определяется разложением сигнала в том же базисе $F(k) = \int f(t) \varphi_k(t) dt$.

При разложении аналитического сигнала необходимо учитывать, что если сам сигнал или составляющая его компонента коррелирует с базисом $\{\varphi_k\}$, то в спектре $F(k)$ содержатся экстремумы (максимумы) при значениях k . Это позволяет из общего аналитического сигнала выделять компоненты, коррелирующие с базисными функциями $\{\varphi_k\}$.

Падение напряжения в цепи сенсора, включенного в автономный измерительный канал, измеряется в момент состояния равновесия газочувствительного слоя.

К измеряемым величинам, участвующим в дальнейших расчетах, относятся: падение напряжения в каждом аналитическом канале U_i , где i – номер канала и $i = 1 \div 8$. Частота измерений изменяется в диапазоне от 1 до 1000 Гц и устанавливается кратно 2^n , таким образом, оптимальная частота измерений $\nu = 2^n$, $n = 0 \div 10$.

Измеряемые величины подвержены искажениям, которые обусловлены аналого-цифровыми преобразованиями элементов схемы включения, оцифровки и передачи данных. Флуктуации измеряемого напряжения имеют структуру белого шума. Поэтому к выходному сигналу можно применять любой метод сглаживания, согласованный с нормальным распределением. Одним из оптимальных методов сглаживания является метод экспоненциального сглаживания – $\tilde{U}(t+1) = pU(t) + (1-p)\tilde{U}(t)$ или, переходя к полным дифференциалам, получим итерационную зависимость вида

$$\frac{d\tilde{U}(t)}{dt} = pU(t) - \tilde{U}(t).$$

Так как измеряемые значения удовлетворяют условиям $U > 0$, $U \in \mathbb{R}$; $\tilde{U} \in \mathbb{R}^2$ и распределены нормально, целесообразно рассчитать основные статистические параметры – моменты первого и второго порядка в каждый момент времени.

Текущее среднее в каждой точке аналитических измерений рассчитывается как

$$\tilde{U}(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \tilde{U}(t),$$

где t – текущее время, T – полное время измерений, $t \in \mathbb{R}$. Соответственно, полная дисперсия в каждой точке рассчитывается как

$$Z(t) = [\tilde{U}(t) - \tilde{U}(t)]^2.$$

Рассчитанные значения текущего среднего и полной дисперсии однозначно определяют распределение Гаусса в каждой точке $f(\tilde{U}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{Z}} e^{-\frac{(\tilde{U}-\tilde{U})^2}{2Z^2}}$ или после преобразований:

$f(p) = \frac{1}{2\pi\sqrt{Z}} e^{-\frac{1}{2Z}}$. Обозначив \sqrt{Z} через p , получим $f(p) = \frac{1}{2\pi p} e^{-\frac{1}{2p^2}}$. Максимум распределения Гаусса определяется временем, соответствующим наступлению равновесия по $Z(t)$ (рис. 1).

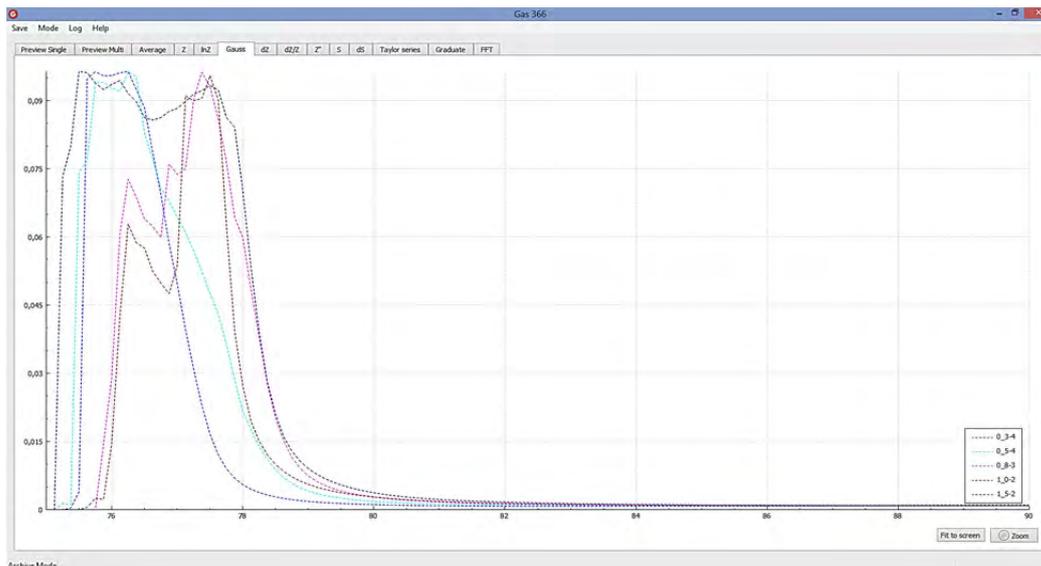


Рис. 1. Распределение Гаусса при обнаружении гептила и амила

Принимая во внимание, что измерения, проводимые с помощью полупроводниковых сенсоров, носят кинетический характер, целесообразно вместе с расчетами значений Z в реальном времени рассчитать также dZ и d^2Z . Для стабильного аналого-цифрового преобразования расчеты первой и второй производной (рис. 2) проводятся по алгоритму расчета частичных сумм: $\frac{dZ}{dt} = dZ = \frac{Z_{i+k} - Z_i}{k}$. Аналогично проводится расчет и для второй производной.

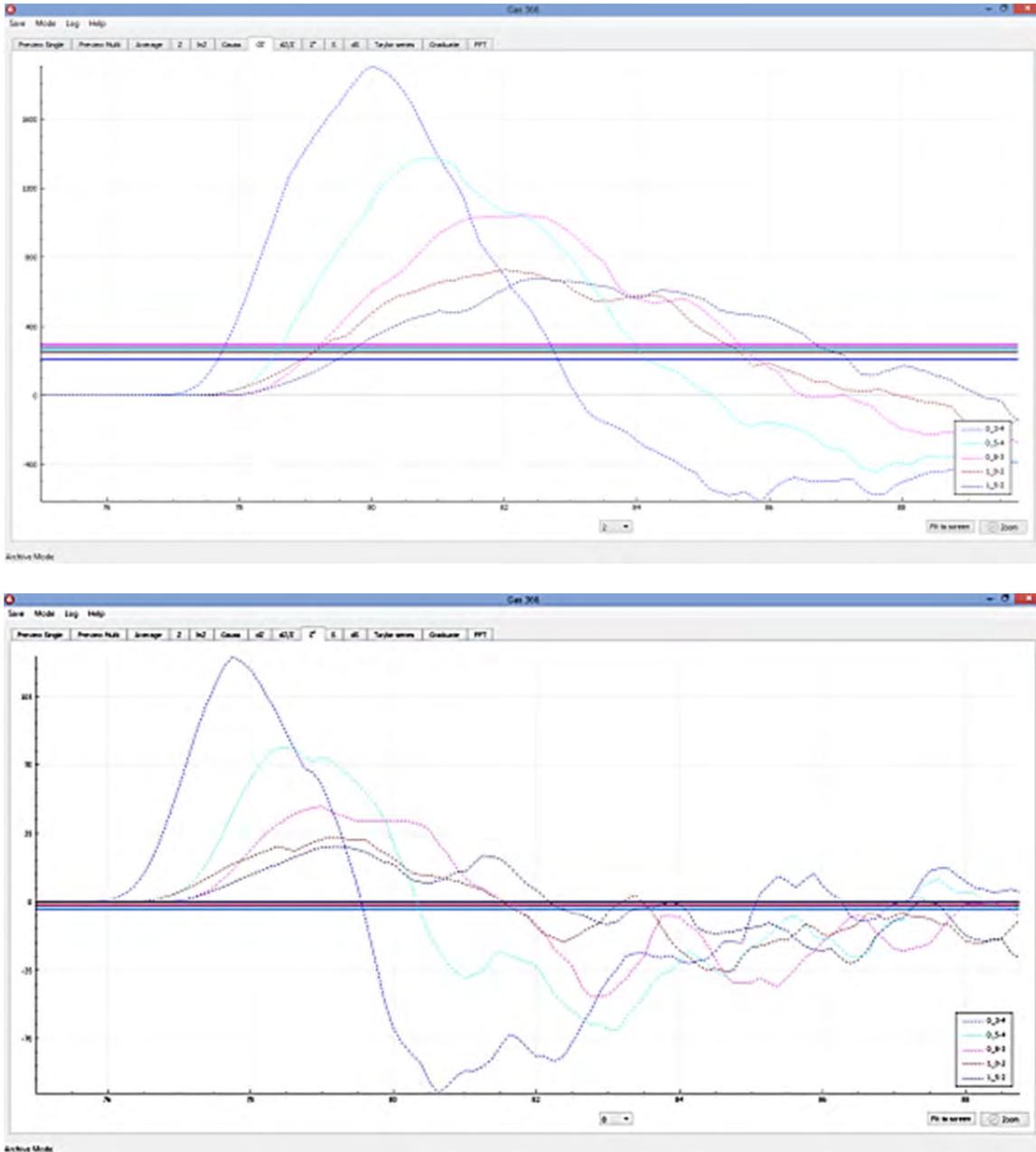


Рис. 2. Первая и вторая производная дисперсии

Уравнение вида ZdZ является полным дифференциалом по Z и в то же время представляет собой свертку функционалов $Z(t)$ и $dZ(t)/dt$, элементы которой составляют спектр $U(t)$, полученный на промежутке T .

Интегрирование полного дифференциала приводит к уравнению

$$ZdZ \rightarrow \int ZdZ \rightarrow \frac{Z^2}{2} + C,$$

где постоянная интегрирования C пропорциональна калибровочному сопротивлению в равновесном плече схемы включения сенсора. Таким образом, возведя в квадрат $Z(t)$, т.е. проведя преобразование $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$, а затем продифференцировав $Z^2(t)$, получим

$$\frac{d^2 Z(t)}{dt^2} = 2Z(t) \frac{dZ(t)}{dt} = 2ZdZ,$$

что соответствует свертке $\frac{1}{2}ZdZ$.

Производная свертки определяет изменения спектральной составляющей во времени и позволяет связать Z -преобразованный сигнал (момент второго порядка) с его кинетикой (скоростью реакции хемосорбции) и динамикой (переходом в равновесное состояние), что полностью определяет состояние гетерогенной системы: адсорбат – адсорбент. В нашем случае адсорбат – молекулы примеси в газовой фазе, адсорбент – газочувствительный слой сенсора.

Итак, производная свертки определяется как $ZdZ^2 + Zd^2Z$ или $Z[(dZ)^2 + d^2Z]$ (рис. 3).

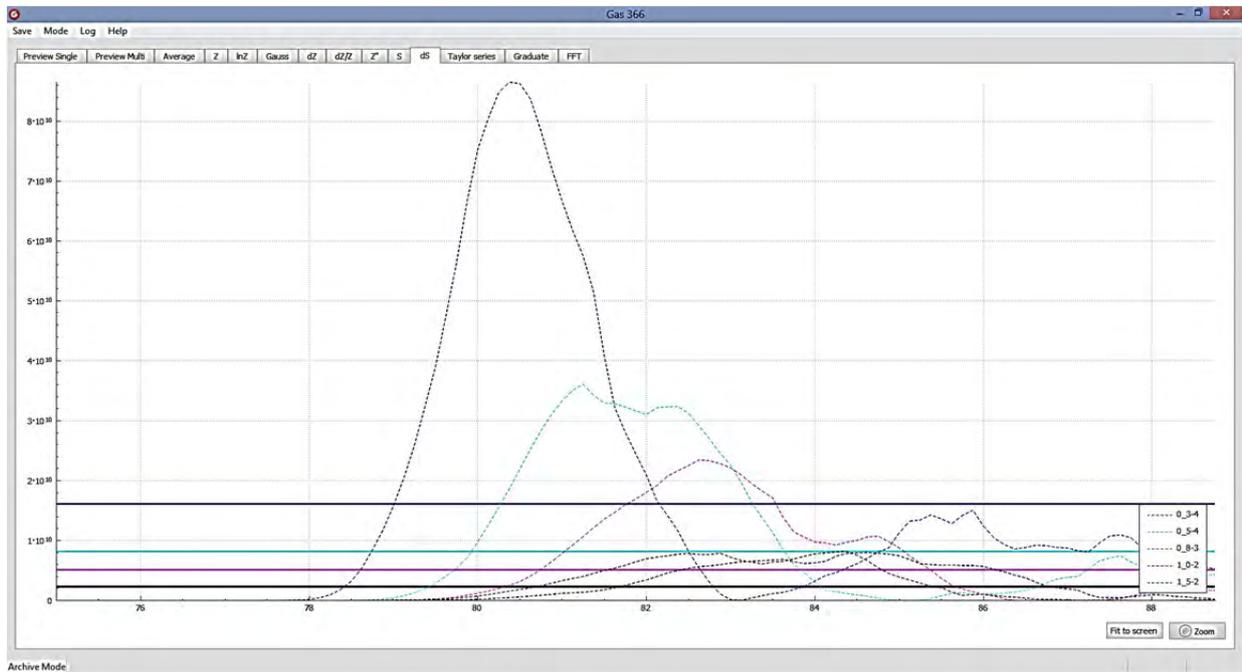


Рис. 3. Спектр, полученный сверткой дисперсии и первой производной

Автономность системы, составленной из n сенсоров, накладывает ряд условий на физическую организованность размещения сенсоров, что в свою очередь сказывается на конструкции камеры расположения аналитических каналов.

Автономность (полнота) системы сенсоров определяется линейной независимостью функций, образующих единственный базис, – одну и только линейную комбинацию функционалов взаимодействия вещества из газовой фазы с газочувствительными слоями сенсоров, входящих в аналитическую систему.

Условие полноты (автономности) мультиканальной аналитической системы определяется равенством Парсеваля $(Z_x, Z_x) = \sum (Z_x, e_i)$, где $Z_x = Z_1 e_1 + \dots + Z_8 e_8$. В свою очередь каждый элемент системы можно выразить через известный базис и канонический функционал «вещество – сенсор»: $Z_i = \frac{(Z_x, e_i)}{(e_i, e_i)}$.

Одним из методов селективной идентификации является метод составления линейного уравнения по аналитическому базису, являющемуся ортогональным по отношению к составу анализируемой среды. Данный метод требует предварительной калибровки – измерения индикации

онных эффектов по каждому из компонентов примесей с помощью фиксированной системой сенсоров.

Составим систему уравнений вида

$$\begin{aligned} Z_{11}X_1 \quad \dots \quad Z_{18}X_8 &= Z_{01} \\ \dots \quad \dots \quad \dots & \\ Z_{81}X_1 \quad \dots \quad Z_{88}X_8 &= Z_{08} \end{aligned}$$

где $Z_{01}-Z_{08}$ – преобразованные сигналы от однокомпонентной смеси, Z_{ij} – преобразованные сигналы, полученные от сложной смеси, X_1-X_8 – компоненты вектора состояния, получаемые в результате решения системы уравнений. Количество уравнений определяется количеством аналитических каналов [9].

Данный подход позволяет независимо от преобразованного сигнала провести как групповую, так и индивидуальную идентификацию компонент сред сложного состава.

Библиографический список

1. Белозерцев, А. И. Причинно-следственный подход к моделированию надежности системы «газовая фаза – полупроводник» / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 3–9.
2. Белозерцев, А. И. Эмпирическая модель идентификации вещества многокомпонентных парогазовых смесей» / А. И. Белозерцев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 10–17.
3. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1988. – С. 138.
4. Пестряков, В. Б. Фазовые радиотехнические системы / В. Б. Пестряков. – М. : Сов. радио, 1958. – С. 308–352.
5. Тихонов, В. И. Различие сигналов со случайными амплитудой и фазой / В. И. Тихонов // Оптимальный прием сигналов. – М. : Радиосвязь, 1963. – С. 123–140.
6. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности : справ. изд. / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин ; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
7. Справочник по прикладной статистике : в 2 т. / пер. с англ. под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С. А. Айвазяна, Ю. Н. Тюрина. – М. : Финансы и статистика, 1990. – Т. 2. – 526 с.
8. Аффифи, А. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ : пер. с англ. / А. Аффифи, С. Эйзен. – М. : Мир, 1982. – 488 с.
9. Дронов, С. В. Многомерный статистический анализ : учеб. пособие / С. В. Дронов. – Варна, 1972. – 213 с.

Николаев Андрей Валерьевич

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Эль-Салим Суад Зухер

доктор физико-математических наук, профессор,
генеральный директор
ООО «Омега»
(199048, Россия, г. Санкт-Петербург,
наб. реки Смоленки, д.19-21, лит. В)
E-mail: suad-olka@yandex.ru

Nikolaev Andrey Valer'evich

director general,
Scientific Research Institute for Physical Measurements
(440026, 8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Al-Salim Suad Zuher

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
director general,
Ltd «Omega»
(199048, lit. In, 19-21 embankment
of the Smolenka river, Saint-Petersburg, Russia)

Аннотация. Рассмотрены преобразования динамических измерений, их классификация и разработка алгоритма обработки кинетических данных. Процесс первичной обработки представлен в виде ряда процедур с операциями, принадлежащими пространству рациональных чисел. Показаны процедуры

Abstract. In work transformations of dynamic measurements, their classification and development of an algorithm of processing of kinetic data are considered. Process of roughing-out is presented in the form of a number of procedures, with the operations belong into space of rational numbers. Procedures of a filtration of

фильтрации данных, корректировка базовой линии, шумоподавление, предварительная статистическая оценка измеряемых параметров. Определена необходимость выбора весовых функций линейных операторов над полем обобщенных значений результатов измерений. Показано, что введение обобщенных координат позволяет использовать формализм Гамильтона и вместо производных по времени перейти к операторам первого и второго порядков. При этом аналитическая система может быть полной лишь тогда, когда она наделена свойством эргодичности и обратимостью во времени. Предложено сложный аналитический сигнал разлагать в спектр по частотам – (переменным) параметрам, обратным времени. Применен метод селективной идентификации, когда составляется линейное уравнение по аналитическому базису, являющемуся ортогональным по отношению к составу анализируемой среды, что позволяет независимо от преобразованного сигнала провести как групповую, так и индивидуальную идентификацию компонент сложного состава.

Ключевые слова: алгоритм, суперпозиция, функционал Гаусса, детерминированные процессы, модель Лоренца и Гаусса.

data, correction of the basic line, noise reduction, a preliminary statistical estimate of gaged parameters are shown. Need of the choice of weight function of the linear operators over the field of the generalized values of observed data is defined. It is shown that the introduction of generalized coordinates makes it possible to use the Hamiltonian formalism and, instead of time derivatives, go over to first and second order operators. Moreover, the analytic system can be complete only if it is endowed with the property of ergodicity and time reversibility. A complex analytic signal is proposed to be decomposed into the spectrum in terms of frequencies – (variable) parameters, inverse to time. The method of selective identification is applied when a linear equation is compiled based on an analytical basis that is orthogonal with respect to the composition of the medium being analyzed, which makes it possible, independently of the transformed signal, to perform both group and individual identification of components of complex composition media.

Key words: an algorithm, superposition, a functional of Gauss, the determined processes, model of Lorentz and Gauss.

УДК 681.586.72

Николаев, А. В.

Алгоритм обработки кинетических данных в процессе анализа газовых смесей / А. В. Николаев, С. З. Эль-Салим // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 19–27. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-3.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков

Введение

В соответствии с действующими стандартами при разработке и производстве новых изделий проводятся лабораторно-стендовые испытания на вибрационное воздействие в режимах, соответствующих внешнему диапазону эксплуатационных воздействий. В частности, в соответствии с ГОСТ 30630.1.1–99 испытания методом 100–1 проводятся в диапазоне частот $(0,2 f_{кр} - 1,5 f_{кр})$, но не выше 2000 Гц. Здесь под $f_{кр}$ понимают критическую частоту, соответствующую резонансной частоте, или частоту, при которой имеет место нарушение работоспособности изделия, приводящее к его отказам или образованию и развитию дефектов [1].

Проведение испытаний на воздействие вибраций является важным этапом отработки конструкций изделий, и им, как правило, предшествует математическое моделирование поведения конструктивных элементов изделия при вибрационном воздействии. При этом чаще всего используются простейшие модели [2], не позволяющие получить адекватную картину состояния реального изделия. Актуальность создания современных методик экспериментальных исследований РЭС и приборных устройств показана в работах [1, 3].

Методика экспериментально-теоретических исследований

При использовании экспериментально-теоретического метода исследования динамических характеристик изделий и их элементов большую роль играет выбор мест размещения на исследуемом объекте, например плате, измерительных устройств (датчиков), которые регистрируют исследуемый параметр (перемещение, ускорение, деформацию). Наиболее эффективным следует считать размещение датчиков в точках, где регистрируемый параметр принимает максимальное значение. В зависимости от поставленной цели экспериментальных исследований наиболее эффективным следует считать размещение измерительных датчиков в зонах наиболее нагруженных ЭРИ, размещенных на платах, или в наиболее нагруженных зонах платы, где возможно проявление латентных дефектов.

Экспериментальным исследованиям должны предшествовать математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) платы, позволяющий определять точки размещения на плате измерительных устройств с целью получения максимально информативных экспериментальных данных по динамическому состоянию платы. Математические модели, их анализ и результаты численного моделирования, выполненные в работах [3–6], позволяют предложить методику определения оптимальных мест установки измерительных устройств для проведения динамических испытаний с целью получения максимальной информации о вибронагруженности исследуемого объекта.

Применительно к платам с навесными ЭРИ в качестве адекватной динамической модели следует принимать трехмерную модель, учитывающую способ крепления ЭРИ к плате [4].

Проведенные исследования по численному моделированию НДС плат с ЭРИ показали, что как правило, зоны, в которых достигаются максимальные прогибы, напряжения и ускорения, не совпадают между собой и могут иметь место на различных резонансных частотах изделия. В связи с этим в зависимости от исследуемого параметра при предварительном моделировании НДС можно выделить наиболее эффективные места установки измерительных устройств и определить наиболее опасные с точки зрения вибропрочности и виброустойчивости частотные диапазоны для наиболее эффективного проведения виброиспытаний.

Принципиальная структурная схема предлагаемой методики экспериментально-теоретических исследований представлена на рис. 1. Содержание блоков структурной схемы методики (см. рис. 1):

- 1) в соответствии с поставленной задачей исследования выбирается математическая модель платы в соответствии с проведенными исследованиями [4, 5];
- 2) геометрическое изображение модели платы (a, b – размеры в плане; h_k – толщина слоев платы);
- 3) размещение ЭРИ на плате с учетом их координат, способа крепления к плате (толщина шва, размеры шва, габаритные размеры ЭРИ);
- 4) ввод координат точек крепления платы (при диаметре более 6 мм необходимо учитывать диаметр винтов крепления);
- 5) ввод физико-механических характеристик материалов слоев гетерогенной структуры платы (модули упругости E_k , коэффициенты Пуассона μ_k , плотности ρ_k , логарифмический декремент затухания);
- 6) расчет собственных частот f_j и выбор частот, расположенных в интервале $f_{\min} \leq f_j \leq f_{\max}$, где f_{\min} и f_{\max} – минимальная и максимальная частоты соответственно, определяющие интервал частот, в котором планируется проведение испытаний;
- 7) моделирование форм собственных колебаний, соответствующих частотам f_j , и их анализ;
- 8) для выбранных форм собственных колебаний на частотах f_j выполняется численное моделирование НДС исследуемой модели платы и определяется поле перемещений $W(x, y)$, эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эkv}}(x, y)$ и деформаций $\epsilon_{\text{эkv}}(x, y)$ по поверхности платы (x, y – координаты в плоскости платы) [4–6];
- 9) анализ НДС и определение координат точек x_i, y_i , в которых перемещения, напряжения и деформации принимают максимальные значения;
- 10) выполнение адаптации координат x_i, y_i к поверхности платы и наиболее нагруженным ЭРИ. Вывод на печать оптимальных координат для размещения регистрирующих устройств и соответствующих им значений $\max W, \max \sigma_{\text{эkv}}, \max \epsilon_{\text{эkv}}$.

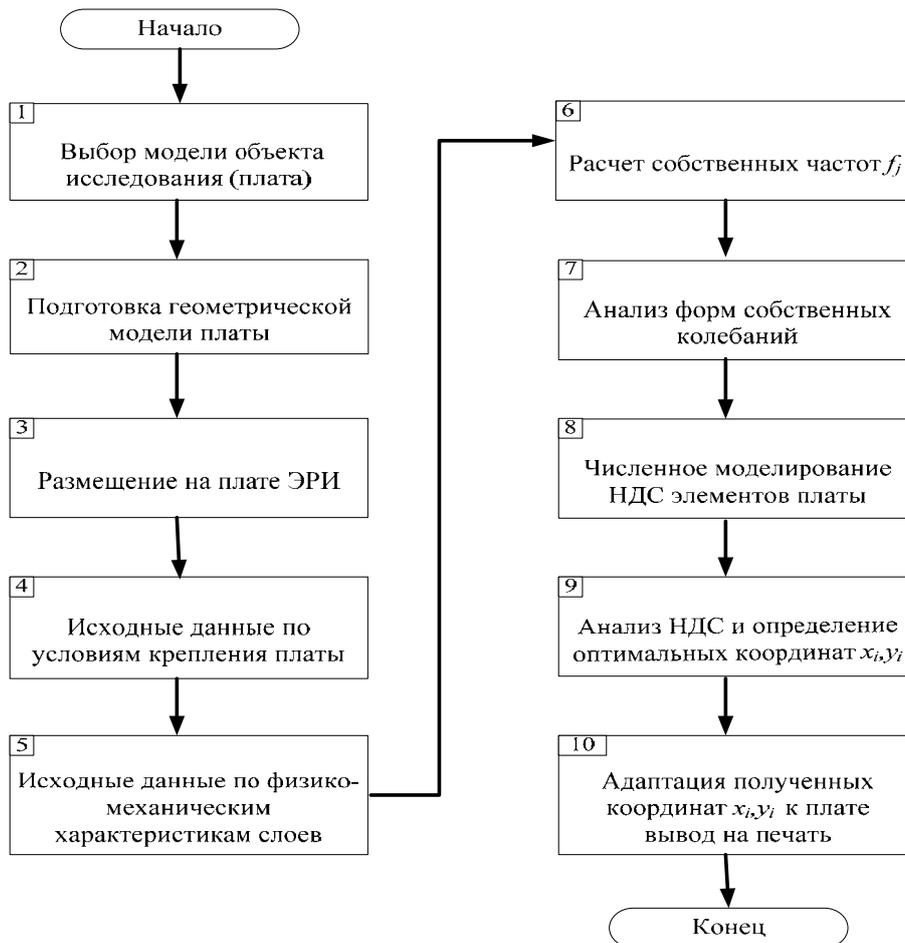


Рис. 1. Структурная схема методики

Предложенная методика определения мест установки измерительных устройств основана на результатах предварительного вычислительного эксперимента, проведенного с использованием математических моделей, адекватно описывающих динамическое состояние исследуемого объекта при вибрационном воздействии, в заданном частотном диапазоне. Знание частот и форм собственных колебаний позволяет наиболее точно определить места расположения измерительных виброустройств на плате при проведении динамических испытаний для экспериментального анализа виброрельефа и вибропрочности плат.

Из анализа НДС платы и ее элементов, соответствующих каждой из форм колебаний, можно прогнозировать наиболее вероятные зоны возникновения и развития латентных дефектов (непроклеи, непропаи, микротрещины и т.п.), что позволяет на этапе изготовления изделия вводить специальные дополнительные операции по контролю качества изделия.

Практическое применение методики

В качестве примера практического применения предложенной методики рассмотрим плату с ЭРИ, представленную на рис. 2, где в масштабе сохранены габариты ЭРИ и их место расположения на плате [6]. Для анализа НДС платы ЭРИ пронумерованы. Плата крепится к основанию электронного блока прибора пятью винтами.

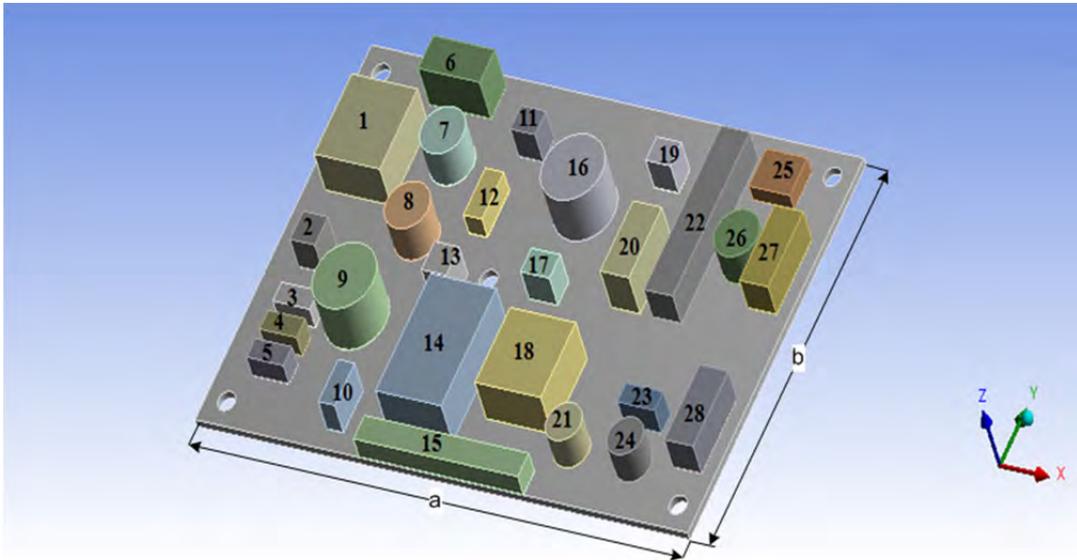


Рис. 2. Плата

При компьютерном моделировании принято: размеры платы $(a \times b) = (120 \times 80) \text{ мм}^2$; $h = 1,5 \text{ мм}$; материал платы стеклотекстолит с модулем упругости $E = 3 \cdot 10 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,22$ и плотностью $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, толщина швов $h_{\text{ш}} = 0,1 \text{ мм}$, материал швов – припой ПОС-61; крепление платы к основанию осуществляется винтами диаметром 4 мм. На плату в направлении оси z (рис. 2) действует ускорение $10g$, а среднее значение логарифмического декремента затухания для платы принято равным $0,133$.

В табл. 1 представлены значения первых восьми собственных частот f_j , расположенных в частотном диапазоне $20 \leq f_j \leq 2000$ (Гц) при температуре окружающей среды в диапазоне $T = (-60; +125)^\circ\text{C}$.

Таблица 1

Собственные частоты платы f_j

T, °C	Частоты f_j , Гц							
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
-60	547,1	690,0	786,8	869,8	1137,9	1554,3	1795,1	1902,1
22	531,7	672,3	768,8	844,8	1107,7	1529,7	1777,3	1871,5
125	511,2	648,4	743,3	812,9	1068,3	1497,8	1753,2	1833,1

Анализ полученных результатов показывает, что изменение температуры внешнего воздействия с $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению значений собственных частот на $3,8\dots 7,1\%$ в зависимости от номера собственной частоты.

На рис. 3 показаны первые четыре формы собственных колебаний платы при температуре $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, на которых имеют место резонансы. Флажками показаны точки, в которых прогибы платы достигают максимальных значений ($\max W$). При других температурах формы колебаний существенно не меняются. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) максимальных прогибов в исследуемом частотном диапазоне представлены на рис. 4.

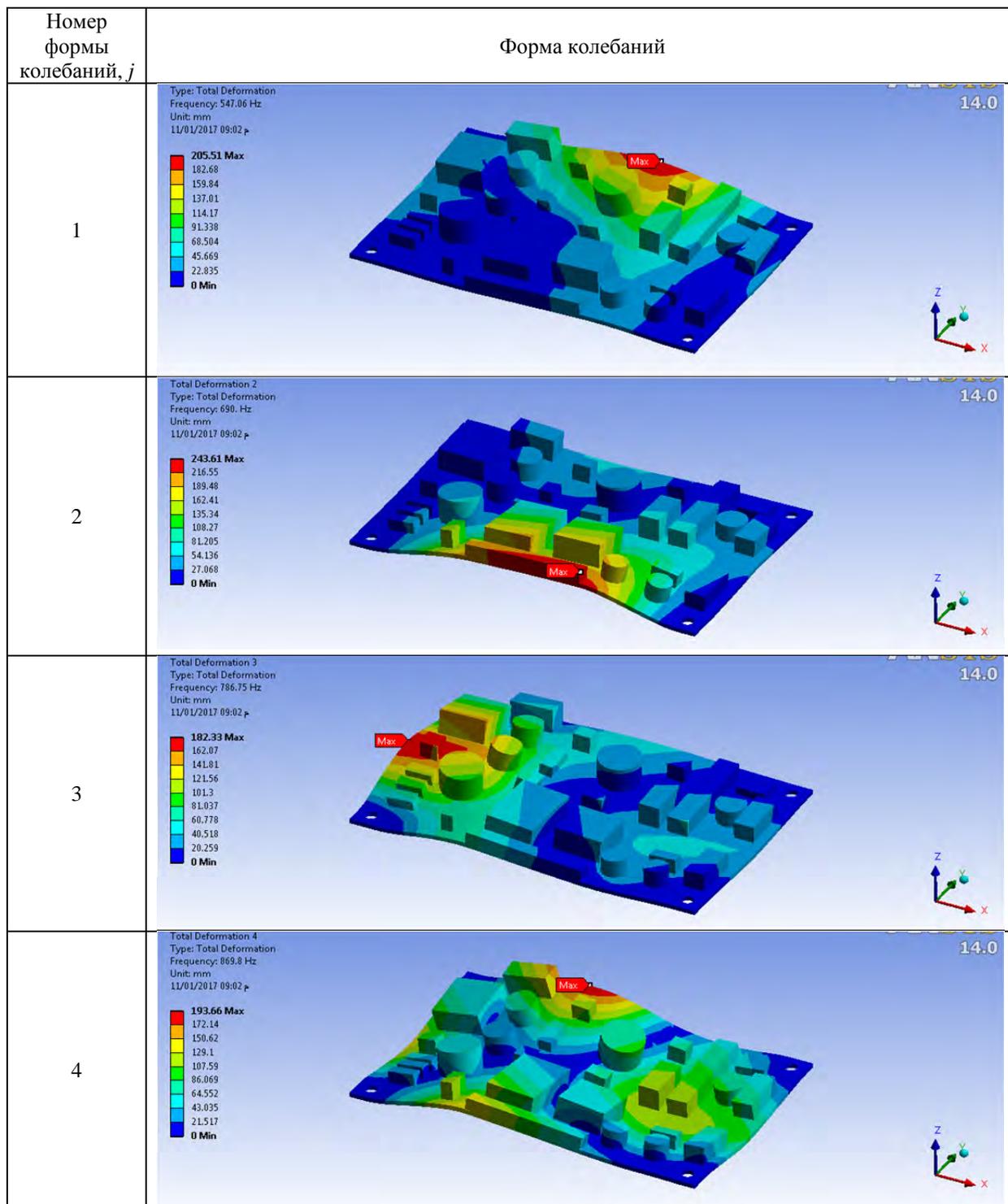


Рис. 3. Формы колебаний платы при $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ полученных результатов показывает, что максимальный прогиб платы равен $\max W = 3,4 \cdot 10^{-2}$ мм и достигается при $T = 125$ °С на второй форме колебаний (см. рис. 3) при частоте $f_2 = 648,4$ Гц.

Если при проведении динамических испытаний платы используются датчики перемещений, то их необходимо устанавливать на плате в точках, отмеченных на рис. 3 флажками, где прогиб достигает максимальных значений. Анализ АЧХ (рис. 4) показывает, что наиболее информативным является частотный диапазон $0,7f_2 \leq f_j \leq 1,4f_2$, т.е. диапазон частот $f = (450 \dots 910)$ Гц.

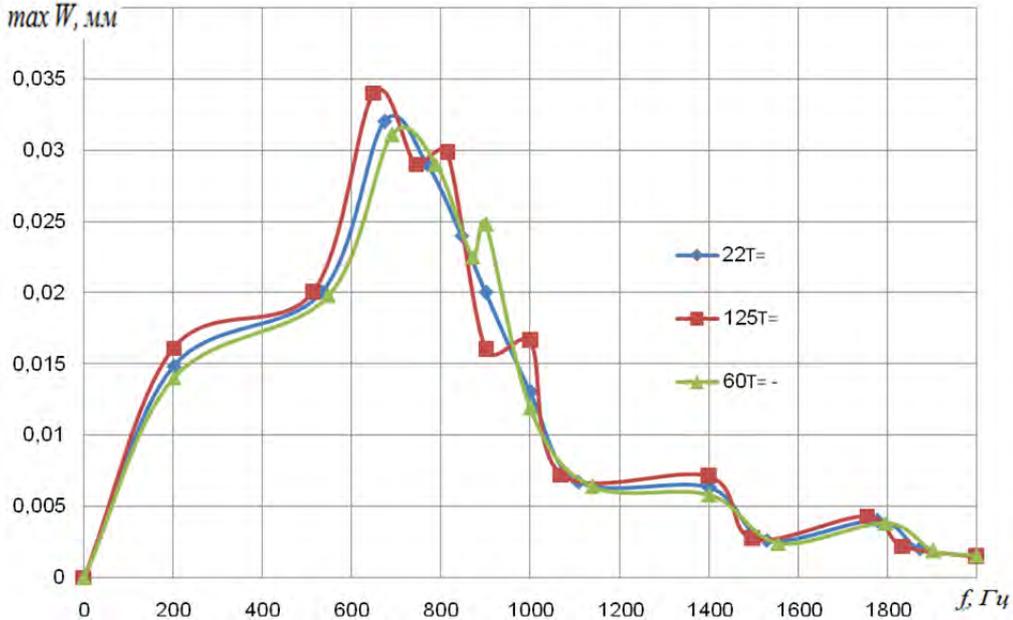


Рис. 4. АЧХ платы

НДС платы в исследуемых частотном и температурном диапазоне моделировалось с использованием критерия прочности Мизеса. Анализ НДС показал, что наиболее нагруженной зоной платы является место расположения 13ЭРИ возле его угловой точки, расположенной вблизи пятой точки крепления платы (см. рис. 2) При этом максимальные напряжения достигаются на четвертой форме колебаний при $T = 125$ °С и частоте $f_4 = 812,9$ Гц. Изменение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в зоне наиболее нагруженного ЭРИ в частотном диапазоне при различных тепловых воздействиях представлено на рис. 5.

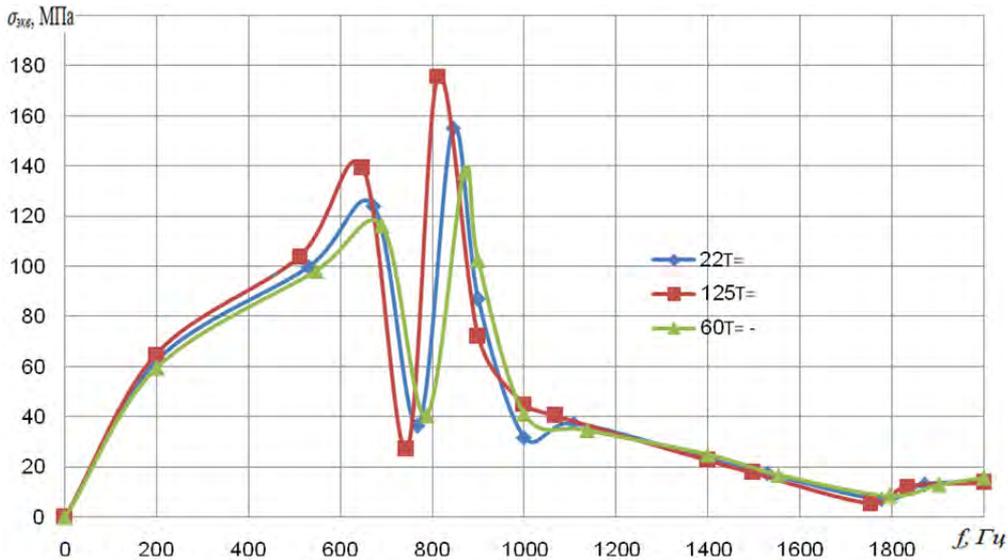


Рис. 5. Изменения $\sigma_{\text{экв}}$ в зоне 13ЭРИ

Очевидно, что если проводятся испытания на вибропрочность исследуемой платы, то датчики, измеряющие относительную деформацию (например, тензорезисторные датчики), следует размещать в наиболее нагруженной зоне платы возле 13ЭРИ. Наиболее информативным, с точки зрения НДС платы, является интервал $0,7f_2 \leq f_j \leq 1,4 f_2$, т.е. частотный диапазон $f = (570 \dots 1140)$ Гц.

Следует отметить, что подробный анализ смоделированного НДС платы по всей ее поверхности показывает, что в остальных ее зонах в исследуемых тепловом и частотном диапазонах эквивалентные напряжения не превышают $\sigma_{\text{экр}} 42,5$ МПа. Следовательно, указанный частотный диапазон является наиболее информативным с точки зрения вибропрочности платы. Виброиспытания рекомендуется проводить при $T = 125$ °С.

Выводы

Предложенная методика рекомендуется к практическому использованию на ранних стадиях проектирования конструктивных элементов приборных устройств различного назначения для обеспечения вибропрочности и виброустойчивости приборов в реальных условиях эксплуатации. Ее применение позволяет существенно сократить сроки проектирования новых и модернизации существующих приборных устройств за счет сокращения объема необходимых экспериментальных исследований и оптимизации принимаемых конструкторско-технологических решений. Все это в результате приводит к сокращению экономических затрат на проектирование и модернизацию изделий. Проведенный анализ НДС элементов конструкций позволяет также научно обоснованно анализировать возможные причины отказов изделий в эксплуатации или при испытаниях [7].

Предварительное моделирование НДС позволяет также научно обоснованно назначать оптимальные режимы технологических тренировок изделия, включающих тепловые и вибрационные воздействия, для выявления возможных скрытых производственных дефектов [8].

Библиографический список

1. Галушко, Д. А. Методика проведения испытаний электронных средств на стойкость к внешним вибрационным воздействиям с учетом их конструктивных особенностей / Д. А. Галушко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 373–376.
2. Хади, О. Ш. Анализ моделей для исследования динамических характеристик плат РЭС / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Модели, системы и сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 1(13). – С. 184–188.
3. Затылкин, А. В. Методика исследования радиоэлектронных средств опытно-теоретическим методом на ранних этапах проектирования / А. В. Затылкин, Д. А. Галушко, А. В. Лысенко // Вестник СГАУ им. акад. С. П. Королева (НИУ). – 2012. – № 7 (38). – С. 91–96.
4. Хади, О. Ш. Анализ вибропрочности плат приборных устройств при динамических воздействиях / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 173–176.
5. Хади, О. Ш. Исследование влияния конструктивных особенностей плат на их динамические характеристики / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Г. В. Гуральник // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 245–250.
6. Hadi, A. Sh. Modeling the state of circuit boards for the instrument devices of operational effects / A. Sh. Yadi, A. N. Litvinov // Information Innovative Technologies : Intern. Scient. – Practical Conf. – Prague, 2017.
7. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
8. Литвинов, А. Н. Выбор режимов технологической вибрации приборов в процессе их производства / А. Н. Литвинов, А. А. Иофин, В. Я. Баннов ; под. ред. А. А. Иофина // Радиовысотометрия – 2010 : сб. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог Исеть, 2010. – С. 98–102.

Артамонов Дмитрий Владимирович
 доктор технических наук, профессор,
 первый проректор,
 Пензенский государственный университет
 (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: politeh@pnzgu.ru

Artamonov Dmitriy Vladimirovich
 doctor of technical sciences, professor,
 First Vice-Rector,
 Penza State University
 (440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Литвинов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной механики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: aleksletvinov@mail.24

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Litvinov Aleksandr Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied mechanics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цель.* Исследование динамических характеристик плат приборных устройств в процессе их проектирования проводится с целью выявления их виброрельефа, определения резонансных частот и форм колебаний, а также анализа их вибропрочности при внешних эксплуатационных воздействиях. В работе предложена методика определения мест установки измерительных устройств на платах, включающая этап математического моделирования их динамического состояния, обеспечивающая максимальную информативность при проведении виброиспытаний. *Материалы и методы.* В статье рассмотрены платы с навесными электрорадиоизделиями приборных устройств, подверженные действию гармонической вибрационной нагрузки. Разработана методика проведения экспериментально-теоретических исследований, основанная на предварительном математическом моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) платы при действии эксплуатационных динамических нагрузок. Моделирование НДС платы выполняется с использованием метода конечных элементов (МКЭ)), реализованного в пакете ANSYS с учетом того, что плата представляет собой слоистую гетерогенную структуру. *Результаты.* Разработана методика, применение которой позволяет устанавливать наиболее эффективные места установки измерительных устройств на платах, с целью получения максимальной информации о НДС платы и ее элементов при проведении вибрационных испытаний. *Выводы.* Проведенные численные исследования показали, что применение предложенной методики на ранних стадиях проектирования приборных устройств позволяет существенно повысить их вибропрочность, сократить сроки и объемы выполняемых экспериментальных работ, а также существенно сократить экономические затраты на проектирование новых и модернизацию существующих приборных устройств.

Ключевые слова: плата, приборное устройство, математическое моделирование, напряженное состояние, методика, виброиспытание, вибропрочность.

УДК 531.3:618.2.08

Артамонов, Д. В.

Методика проведения экспериментально-теоретических динамических исследований в процессе проектирования приборных устройств / Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 28–34. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-4.

Abstract. *Background.* Investigation of dynamic characteristics of circuit boards in design of instrument devices with the purpose of revealing their vibration relief, determining resonance frequencies and oscillation forms, and also analyzing their vibration resistance under external operational influences, is carried out. In this paper, a technique for determining the locations for installation of measuring devices on circuit boards, including the stage of mathematical modeling of their dynamic state, providing maximum information in the conduct of vibration tests, is proposed. *Materials and methods.* In the article, the circuit boards with hinged electronic components of instrument devices subject to harmonic vibration loading are considered. A technique for performing experimental and theoretical studies, based on preliminary mathematical modeling of the stress-strain state (SSS) of the circuit board under operational dynamic loads is developed. Modeling of the circuit board SSS is performed using the finite element method (FEM) implemented in ANSYS package, taking into account that the circuit board has a layered heterogeneous structure. *Results.* A technique that allows the detection of the most effective locations for measuring devices on circuit boards has been developed to obtain maximum information about SSS of the circuit board and its elements during the vibration testing. *Conclusions.* The conducted numerical studies have shown that the application of the proposed technique at the early stages of designing instrument devices suggests a significant increase in their vibration resistance, helps to reduce time and amount of the performed experimental work, and significantly reduce the economic costs of designing new and upgrading the existing instrument devices.

Key words: circuit board, instrument device, mathematical modeling, stress state, technique, vibration test, vibration resistance.

**ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
МУЛЬТИАГЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ
МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ
В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ¹**

А. К. Гришко, А. В. Лысенко, И. И. Кочегаров

Введение

Интеллектуальные мобильные системы находят широкое применение в различных областях деятельности и относятся к технологиям двойного назначения. Это и различные робототехнические комплексы, беспилотные летающие аппараты, батискафы и т.д. Перед интеллектуальными объектами, наделенными мобильностью ставятся задачи, которые не могут быть решены одним отдельно взятым из них. Кроме того, среда, в которой они выполняют свою задачу, динамично развивается, и принципы централизованного управления становятся неэффективными. Эффективное достижение общей цели невозможно без организации взаимодействия и формирования коалиций между исполнителями. В данной статье представлено краткое описание логико-математического аппарата управления группой интеллектуальных мобильных объектов (ИМО) и как на основании этого аппарата предлагается организовывать мультиагентное взаимодействие ИМО внутри группы, а также анализируются проблемы, с которыми сталкиваются проектировщики систем группового управления.

***Постановка задачи группового управления
интеллектуальными мобильными объектами***

Для начала дадим формальное описание задачи управления группой ИМО как явных представителей наукоёмких систем [1–4].

Пусть некоторая группа R , состоящая из N ИМО $R_j (j = \overline{1, N})$, функционирует в некоторой среде E . Состояние каждого ИМО в момент времени t описывается вектор-функцией $r_j(t) = [r_{j,1}(t), r_{j,2}(t), \dots, r_{j,h}(t)]^T$.

Состояние группы ИМО задается вектором $R(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)]^T$. Состояние среды вокруг j -го ИМО – e_j в момент времени t описывается вектором $e_j = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{m,j}(t)]^m$.

Тогда состояние среды, в которой функционируют ИМО рассматриваемой группы в момент времени t , описывается вектором $e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)]^m$.

Под переменными состояниями $r_j(t) (j = \overline{1, h})$ ИМО обычно понимают, например, координаты его положения в среде E , количество энергоресурса, направление перемещения (курсовой угол), скорость и т.д. в момент времени t [5–7]. Под переменными состояниями $e_{i,j}(t) (i = \overline{1, w})$ среды вокруг j -го ИМО понимают, например, координаты расположения объектов среды (препятствий, других ИМО и др.), а также другие переменные, характеризующие состояние этих объектов в момент времени t [8–10].

Каждый ИМО может выполнять действия, описываемые вектором

$$a_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^m.$$

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Действия ИМО могут: переместиться в заданную точку, захватить некоторый объект, передать какое-либо сообщение другому ИМО и др. Множество действий, которые может выполнять группа ИМО, есть объединение множеств действий отдельных ИМО группы: $\{a_c\} = \{a\}_1 \cup \{a\}_2 \cup \dots \cup \{a\}_N$.

Действия, выполняемые группой ИМО в момент времени t , могут быть описаны с помощью вектор-функции $a_c(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)]^m$.

На состояния ИМО и среды, а также на действия ИМО в конкретных ситуациях могут налагаться некоторые ограничения, в общем случае определяемые системами неравенств [11–13]:

$$G(r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t), e(t)) \leq 0; \quad (1)$$

$$D(r_1(t), a_1(t), r_2(t), a_2(t), \dots, r_N(t), a_N(t), e(t)) \leq 0. \quad (2)$$

С учетом введенных выше обозначений задача группового управления заключается в определении таких оптимальных действий $a_j(t)$ для каждого ИМО, которые с учетом ограничений (1) и (2) наиболее эффективно решают задачу, стоящую перед группой ИМО.

Обозначим через $\varphi(a_j(t))$ для каждого ИМО, определяющую эффективность действий j -го ИМО в контексте решения общей задачи в момент времени t . Если группа состоит из однотипных ИМО и является однородной, то фитнес-функция имеет одинаковый вид для всех ИМО. Если же группа неоднородна, то необходимо определять фитнес-функцию для каждого типа ИМО в группе. Это значит, что характер фитнес-функции напрямую зависит от тех задач, которые решает отдельно взятый ИМО.

Тогда требуется определить такие действия $a_j(t)$ каждого ИМО, при которых достигается экстремум общего функционала для всей группы:

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^N \varphi(a_j(t)). \quad (3)$$

Зависимость задачи управления от условий среды функционирования

Данная задача решается по-разному в зависимости от характера среды E , в которой функционирует группа ИМО, и той задачи, которая поставлена перед группой. Возможны следующие варианты:

- 1) среда E статична, общая задача детерминирована;
- 2) среда E статична, общая задача недетерминирована;
- 3) среда E не статична, общая задача детерминирована;
- 4) среда E не статична, общая задача недетерминирована.

Под детерминированностью задачи понимается наличие эффективных алгоритмов ее решения с помощью группы ИМО.

Первый случай (статичная среда, задача детерминирована) наиболее прост в плане реализации, но встречается реже других случаев. При нем последовательность действий $a_j(t)$ ИМО определяется один раз при проектировании группы ИМО и остается неизменной во время функционирования группы. ИМО сами определяют свои действия в каждый момент времени t по заранее определенному алгоритму. К сожалению, такие случаи практически не встречаются на практике.

Второй случай (статичная среда, недетерминированная задача) значительно сложнее. В этом случае у нас нет эффективного алгоритма решения поставленной общей задачи. Поэтому ИМО в каждый момент времени t приходится самостоятельно принимать решение о своих дальнейших действиях в контексте общей задачи и других ИМО группы. При этом выбор действий должен осуществляться в двух (возможно, противоречащих друг другу) направлениях:

- 1) выбор действий наиболее эффективных в контексте решения общей задачи А;
- 2) выбор действий наиболее эффективных в контексте взаимодействия с другими роботами группы.

Необходимость оптимизации действий ИМО по этим двум направлениям легко проиллюстрировать на следующем примере. Пусть у нас есть набор из M объектов. Необходимо переместить эти объекты из точки P_i в точку P_m . В нашем распоряжении есть N ИМО, каждый из которых может одновременно взять всего n объектов.

В контексте эффективности решения общей задачи ИМО должны направиться в точку P_i и взять столько объектов, сколько они могут транспортировать за одну итерацию. Однако если все ИМО одновременно отправятся в точку P_i , то они будут мешать друг другу и общая эффективность группы снизится. Поэтому роботы должны предварительно договориться друг с другом о том, кто, как и в каком порядке будет забирать транспортируемые объекты из точки P_i .

Задача выбора действий, наиболее эффективных в контексте решения общей задачи, сводится к поиску экстремума фитнес-функции ИМО на множестве допустимых в момент времени t действий [14–16]. Следует понимать, что данная задача оптимизации является многокритериальной. При принятии решения ИМО должен учитывать такие факторы, как: свое текущее положение, положение других ИМО группы, положение препятствий, количество энергоресурса и многие другие факторы.

Помимо этого, множество допустимых действий далеко не всегда является конечным множеством. Например, при выборе действий ИМО должен принимать решение о том, в каком направлении двигаться (поворачиваться) и с какой скоростью. Поэтому имеет место задача многокритериальной оптимизации фитнес-функции по всем переменным состояния каждого ИМО.

Задача выбора действий, наиболее эффективных в контексте взаимодействия с другими ИМО группы, сводится к задаче о сделках. Задача о сделках сводится к нахождению такого соглашения между ИМО, при котором их общая выгода максимальна. Согласно теореме Нэша наиболее оптимальным соглашением является соглашение, при котором находится максимум функции [17, 18]:

$$\psi(x) = (u_1(x) - u_1(d))(u_2(x) - u_2(d)) \rightarrow \max, \quad (4)$$

где x – соглашение на множестве возможных соглашений; $u_i(x)$ – функция полезности j -го участника переговоров, определенная на множестве возможных соглашений; d – точка разногласия (исход, который получают участники, если переговоры не дадут результата).

При этом каждый ИМО не должен забывать об эффективности всей группы (3). Это значит, что принятие решения сводится к оптимизации функций $\Phi(t)$ и $\psi(x)$.

Получается, что задача принятия решения в общем виде сводится к многокритериальной оптимизации фитнес-функции $\varphi(a_j(t))$ отдельного ИМО и функционала $\Phi(t)$ всей группы.

Третий случай (не статичная среда, детерминированная задача) представляет собой симбиоз первого и второго случаев. У нас есть эффективный алгоритм решения поставленной общей задачи, однако мы не можем использовать его в чистом виде (как в первом случае), так как динамичная среда E неизбежно вносит свои коррективы. Из-за этого последовательность действий, которая была эффективна некоторое время назад, теперь могла стать менее эффективной.

В условиях изменяющейся среды фитнес-функция отдельного ИМО приобретает вид

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^N \varphi(a_i(t), e(t)). \quad (5)$$

Задача принятия решения (как и во втором случае) сводится к многокритериальной оптимизации фитнес-функции отдельного ИМО и функционала всей группы. Однако в отличие от второго случая здесь есть два важных момента:

- 1) детерминированность решаемой задачи значительно сужает область поиска при оптимизации;
- 2) нестатичность среды E , в которой функционирует группа ИМО, накладывает серьезные ограничения на время принятия решений.

Решение должно быть принято до того, как среда E изменится значительным образом. Это предъявляет серьезные требования к используемым алгоритмам оптимизации.

Четвертый случай (нестатичная среда, недетерминированная задача) является самым сложным. Этот случай похож на третий случай (нестатичная среда, детерминированная задача) с той лишь разницей, что у нас нет эффективного алгоритма решения поставленной перед группой ИМО общей задачи. Поэтому область поиска при оптимизации априори ничем не ограничивается. При этом требование к скорости принятия решений сохраняется.

Первоначальной задачей группы ИМО является ее самоорганизация, т.е. самостоятельное формирование оптимальной структуры и оптимального алгоритма ее функционирования в соответствии с поставленной задачей, некоторым критерием качества и внешними условиями. Задача самоорганизации в конечном счете также сводится к задаче многокритериальной оптимизации.

Из всего вышесказанного следует, что эффективность функционирования группы ИМО напрямую зависит от эффективности используемых алгоритмов оптимизации.

Задача многокритериальной оптимизации в управлении

Задача многокритериальной оптимизации в общем виде не имеет быстрых и эффективных алгоритмов ее точного решения. Мы можем использовать лишь приближенные алгоритмы, которые дают нам приближенные решения.

В настоящее время принято производить многокритериальную оптимизацию функций $\Phi(t)$ и $\Psi(x)$ на основе множества Парето. Однако такой подход имеет ряд серьезных недостатков.

1) необходимость построения множества Парето. В условиях динамичной среды данное множество с течением времени постоянно изменяется в зависимости от состояния среды и состояния других ИМО группы. Поэтому необходимо постоянно обновлять множество Парето или, что еще хуже, перестраивать;

2) число возможных решений далеко не всегда конечно. Это приводит к невозможности построения множества Парето;

3) множество Парето может быть очень велико. Это приводит к необходимости его сужения, обычно на основе априорной информации об относительной важности критериев.

Однако полностью уйти от задачи многокритериальной оптимизации мы не можем. Единственный выход в таких условиях представляется в ограничении множеств действий, выполняемых отдельным ИМО. Такое ограничение приводит к легко вычисляемому функционалу $\Phi(t)$, что значительно упрощает его оптимизацию. Такого же эффекта можно добиться и для функционала $\Psi(x)$, если ограничить число возможных сделок между ИМО.

Такие ограничения приводят как к упрощению самой задачи управления, так и к неизбежному сужению круга задач решаемых отдельным ИМО. Это приводит нас к «роевым» алгоритмам управления. Поведение ИМО в «рое» носит вероятностный характер. Такой подход позволяет находить вероятностные, приближенные решения оптимизации функции $\Phi(t)$ и $\Psi(x)$ при сравнительно небольшой трудоемкости оптимизации.

Заключение

Задача группового управления неизбежно сводится к задаче многокритериальной оптимизации. Разработка эффективных алгоритмов оптимизации позволит сделать большой скачок вперед в плане группового управления ИМО. Сейчас же приходится умышленно ограничивать области поиска решений, ограничивая тем самым функциональные возможности самих ИМО. Исследования и научные наработки в этой области достаточно интересно и заманчиво распространить и на решение других научно-технических проблем. Так, например, разработчики сложных наукоемких систем (например, радиоэлектронных средств (РЭС) в процессе проектирования предлагают также рассматривать их отдельные элементы, узлы, подсистемы как интеллектуальные мобильные объекты ИМО. Их взаимодействие и учет взаимного влияния параметров в процессе динамического системного проектирования – задача не менее сложная и в то же время по своим подходам к их решению очень схожая.

Библиографический список

1. Маслобоев, А. В. Системный анализ проблемы информационной поддержки сетецентрического управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 29. – С. 10–32.
2. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
3. Generalized structural models of complex distributed objects / M. Yu. Mikheev, T. V. Zhashkova, A. B. Shcherban, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Yerevan, Armenia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807742.
4. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
5. Маслобоев, А. В. Разработка и реализация механизмов управления информационной безопасностью мобильных агентов в распределенных мультиагентных информационных системах / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2010. – Т. 13, № 4-2. – С. 1015–1032.
6. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
7. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
8. Маслобоев, А. В. Система информационно-аналитической поддержки сетецентрического управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Информационные ресурсы России. – 2016. – № 3 (151). – С. 25–31.
9. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
10. Гришко, А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-4.
11. Гришко, А. К. Многокритериальная оптимизация структуры радиоэлектронной системы в условиях неопределенности / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2017. – Т. 1. – С. 317–320.
12. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
13. Grishko, A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. Grishko // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
14. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
15. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
16. Grishko, A. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters / A. Grishko, N. Yurkov, N. Goryachev // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). – Polyna, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, 2017. – P. 179–182. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916109.
17. Grishko, A. K. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, N. V. Goryachev // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – Saint Petersburg, Russia, 2017. – P. 210–212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
18. Grishko, A. K. Multiple factor criteria of controlling the network structure of radio monitoring in partial uncertainty conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, V. A. Trusov // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – Saint Petersburg, Russia, 2017. – P. 207–209. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970539.

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования и производства
радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Интеллектуальные системы находят широкое применение в различных областях деятельности и относятся к технологиям двойного назначения. Перед интеллектуальными объектами, наделенными мобильностью, ставятся задачи, которые не могут быть решены одним отдельно взятым из них. Кроме того, среда, в которой они выполняют свою задачу, динамично развивается, и принципы централизованного управления становятся неэффективными. Организация взаимодействия или формирование коалиций между исполнителями для достижения общей цели является актуальной задачей. Целью данной статьи является анализ проблем, с которыми сталкиваются проектировщики систем группового управления и разработка логико-математического аппарата описания процесса организации группового взаимодействия интеллектуальных объектов и систем внутри группы. *Материалы и методы.* Для оптимизации решения задачи управления предлагается метод мультиагентного управления. *Результаты.* Получен логико-математический аппарат, описывающий процесс организации группового взаимодействия интеллектуальных объектов и систем внутри группы, суть которого заключается в том, что каждый объект группы самостоятельно определяет свои очередные действия на достижение коллективной цели. *Выводы.* Разработанную методику предлагается применять для выбора оптимальной стратегии управления сложных пространственно-распределенных систем, когда децентрализация управления и формирование коалиций между агентами системы обеспечивает минимальные общие затраты материальных ресурсов и времени.

Ключевые слова: мультиагентное управление, интеллектуальный мобильный объект, система, оптимизация.

Grishko Aleksey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. *Background.* Intelligent systems find wide application in various fields, and relate to dual-use technologies. Before intelligent objects, endowed with mobility and the challenges that cannot be solved by one of them. In addition, the environment in which they perform their task is dynamic and the principles of centralized control become ineffective. Organization of interaction or the formation of coalitions between workers to achieve a common goal is an important task. The purpose of this article is to analyze the problems faced by designers of systems for group management and development of logical-mathematical apparatus describing the process of group interaction. *Materials and methods.* For optimizing the solutions of control problems we propose a method of multi-agent control. *Results.* Obtained logical-mathematical apparatus describing the process of group interaction of intelligent objects and systems within the group, the essence of which is that each group object determines its next action to achieve collective goals. *Conclusions.* The developed methodology is proposed to apply to select the optimal strategy for the control of complex spatially distributed systems where decentralization of government, and the formation of coalitions between agents of the system provides a minimum total cost of material resources and time.

Key words: multi-agent control, intelligent mobile object, system, optimization.

УДК 621.8

Гришко, А. К.

Логико-математические принципы мультиагентного управления интеллектуальными мобильными объектами и системами в динамической среде / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 35–41. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-5.

КУСОЧНО-ЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ФУНКЦИЙ МНОГИХ АРГУМЕНТОВ

Э. В. Лапшин, И. Ю. Семочкина, В. В. Самаров

Введение

Объективные показатели имитационных свойств АТ должны позволить провести оценку результирующих характеристик пилотирования, качества управления, основных эргономических характеристик.

Методика формирования объективных оценок должна предусматривать сравнение групп показателей для условий АТ и ЛА.

Отметим, что методика идентификации должна быть увязана с перечнем летно-технических характеристик. Должен быть разработан перечень возможных отклонений характеристик АТ от характеристик ЛА для всех режимов. Возникает также необходимость разработки методики корректировки модулей динамики полета, обеспечивающей устранение указанных отклонений.

Ясно, что требования к системе испытаний динамики полета должны предъявляться исходя из условий формирования полноценных профессиональных навыков при обучении на АТ.

Сравнение характеристик пилотирования, полученных на АТ и реальном ЛА, должно выполняться с учетом допусков на адекватность АТ. Однако пока нет обоснованных способов назначения этих допусков. Отметим, что не решены даже вопросы определения допусков на показатели эталонного пилотирования, характеризующегося его программой (непрерывными и дискретными показателями, определяемыми во временной области, а также рядом функций от параметров состояния) [1, 2].

Кусочно-линейная интерполяция на разреженной сетке

Рассмотрим метод быстрой кусочно-линейной интерполяции, ориентированный на многомерные задачи [3, 5].

Все изложенные выше подготовительные операции, методика выбора шагов прямоугольной равномерной сетки в пространстве аргументов остаются здесь в силе.

Обратимся вновь к элементарной ячейке сетки в виде прямоугольного параллелепипеда. Одна из вершин ячейки именуется базовой, а противоположная – антибазовой. Так, на рис. 1, соответствующем трехмерному пространству аргументов, вершина 1 может быть принята за базовую, вершина 5 – антибазовую. А всего здесь $2^3 = 8$ возможных вариантов назначения базовой и антибазовой вершин. Вершина 1 на рис. 1 ближе всего расположена к началу координат. Такую вершину будем именовать БВБН (базовая вершина, ближайшая к началу). Любой вершине (узлу) соответствует r ближайших вершин, каждая из которых достигается путем перехода из исходной вершины на один шаг Δ_j ($j = 1, 2, \dots, r$) параллельно соответствующей координатной оси Ox_j .

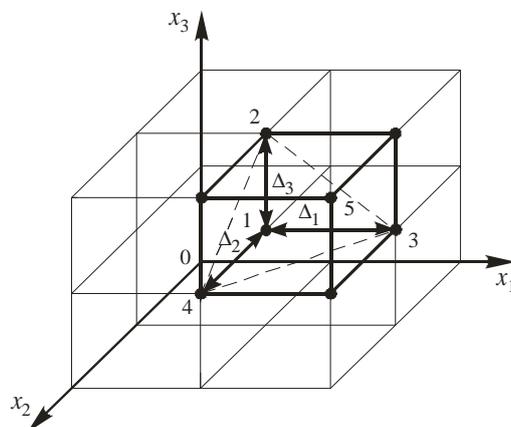


Рис. 1. Элементарная ячейка сетки трехмерного пространства аргументов

Для вершины $[q_1, q_2, \dots, q_r]$ ближайшими являются r вершин:

$$\begin{aligned} &[-q_1, q_2, \dots, q_r], \\ &[q_1, -q_2, \dots, q_r], \\ &\dots\dots\dots, \\ &[q_1, q_2, \dots, -q_r]. \end{aligned} \tag{1}$$

Так, для трехмерного случая рис. 1 ближайшими к вершине l с координатами $\left[-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right]$ являются вершины: $3 \left[\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right]$, $4 \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right]$ и $2 \left[-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$.

В общем случае гиперплоскость, проходящая через ближайшие вершины (1), описывается уравнением

$$\sum_{j=1}^r \frac{x_j}{q_j \Delta_j} = r - 2 + 2 \sum_{j=1}^r q_j + 4 \sum_{j=1}^r q_j i_j. \tag{2}$$

Эта гиперплоскость делит рассматриваемый элементарный параллелепипед на две субъ-ячейки с условными названиями:

– субъячейка базовой вершины

$$\begin{cases} i_j < \frac{x_j}{\Delta_j} < i_j + 1, \quad (j=1, 2, \dots, r), \\ \sum_{j=1}^r \frac{x_j}{q_j \Delta_j} > r - 2 + 2 \sum_{j=1}^r q_j + 4 \sum_{j=1}^r q_j i_j, \end{cases} \tag{3}$$

– субъячейка антибазовой вершины

$$\begin{cases} i_j < \frac{x_j}{\Delta_j} < i_j + 1, \quad (j=1, 2, \dots, r), \\ \sum_{j=1}^r \frac{x_j}{q_j \Delta_j} < r - 2 + 2 \sum_{j=1}^r q_j + 4 \sum_{j=1}^r q_j i_j. \end{cases} \tag{4}$$

Поверхностные точки субъячеек в неравенствах (3), (4) не учитываются.

Определенная симметрия субъячеек базовой и антибазовой вершин имеет место только для двумерного случая, когда эти субъячейки представляют собой треугольники, на которые диагональ делит элементарный прямоугольник. Уже для трехмерного случая симметрия нарушается: субъячейка базовой вершины представляет собой тетраэдр, а субъячейка антибазовой вершины – многогранник с семью вершинами, существенно превосходящий по объему указанный тетраэдр (см. рис. 1). В общем случае субъячейка базовой вершины (3) имеет $r + 1$ вершину, а субъячейка антибазовой вершины имеет $2^r - 1$ вершину, превосходя предыдущую во много раз по объему.

В субъячейке базовой вершины (3) справедлива следующая формула линейной интерполяции [2–6]:

$$\tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_r) = f[q_1, q_2, \dots, q_r] + \sum_{j=1}^r \frac{f[q_1, q_2, \dots, q_r] - f[q_1, \dots, -q_j, \dots, q_r]}{2q_j \Delta_j} \left[x_j - \left(i_j + \frac{1}{2} + q_j \right) \Delta_j \right]. \tag{5}$$

Здесь для краткости обозначено

$$f \left[\left(i_1 + \frac{1}{2} + q_1 \right) \Delta_1, \left(i_2 + \frac{1}{2} + q_2 \right) \Delta_2, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} + q_r \right) \Delta_r \right] = f[q_1, q_2, \dots, q_r].$$

В справедливости формулы легко убедиться, подставляя координаты базовой вершины и ближайших к ней вершин из формулы (1) в формулу (5). Для всех этих вершин получаются тождества (знак \sim опускается).

Для субъядчейки антибазовой вершины (4) получена следующая формула [4, 5]:

$$\tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_r) = D + \sum_{j=1}^r \frac{D - f[q_1, \dots, q_{j-1}, -q_j, q_{j+1}, \dots, q_r]}{2q_j \Delta_j} \left[x_j - \left(i_j + \frac{1}{2} + q_j \right) \Delta_j \right], \quad (6)$$

где

$$D = \frac{1}{r-1} \left(\sum_{j=1}^r f[q_1, \dots, q_{j-1}, -q_j, q_{j+1}, \dots, q_r] - f[-q_1, -q_2, \dots, -q_r] \right). \quad (7)$$

Эта формула может быть названа интерполяционной лишь условно. Дело в том, что она соответствует гиперплоскости в $r+1$ -мерном пространстве функции f и r аргументов, проведенной через точки, соответствующие значениям функции f в r вершинах (1), ближайших к базовой и антибазовой вершине $[-q_1, \dots, -q_r]$. Таким образом, формула (6) дает значения, совпадающие с интерполируемой функцией только в $r+1$ вершине субъядчейки (4) из общего числа $2^r - 1$ вершин этой субъядчейки.

Условность наименования исчезает, если ввести понятие интерполяции на разреженной неравномерной сетке согласно упомянутому списку узлов: r узлов (вершин), ближайших к $[q_1, q_2, \dots, q_r]$, и антибазовая вершина $[-q_1, -q_2, \dots, -q_r]$. Определение можно также дать с использованием понятия симплекса [4, 5, 7].

Назначение базовой вершины в системе алгоритмов (3)–(7) в общем случае произвольно. При фиксированной базовой вершине в каждой элементарной ячейке оно допускает 2^r вариантов. Если в каждой элементарной ячейке в качестве базовой выбирается БВБН $\left[-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2} \right]$, то формулы (3)–(7) принимают следующий вид:

– субъядчейка базовой вершины

$$\begin{cases} i_j < \frac{x_j}{\Delta_j} < i_j + 1, (j = 1, 2, \dots, r), \\ \sum_{j=1}^r \frac{x_j}{\Delta_j} < 1 + \sum_{j=1}^r i_j; \end{cases} \quad (8)$$

– субъядчейка антибазовой вершины

$$\begin{cases} i_j < \frac{x_j}{\Delta_j} < i_j + 1, (j = 1, 2, \dots, r), \\ \sum_{j=1}^r \frac{x_j}{\Delta_j} > 1 + \sum_{j=1}^r i_j; \end{cases} \quad (9)$$

– формула линейной интерполяции в субъядчейке базовой вершины

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_r) = & f\left[-\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}\right] - \sum_{j=1}^r \left(f\left[-\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}\right] - \right. \\ & \left. - f\left[\underbrace{-\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}}_{j-1}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}\right] \right) \times \left(\frac{x_j}{\Delta_j} - i_j \right); \end{aligned} \quad (10)$$

– формулы линейной интерполяции (на разреженной сетке) в субъячейке антибазовой вершины

$$\tilde{f}(x_1, x_2, \dots, x_r) = D + \sum_{j=1}^r \left(D - f \left[\underbrace{-\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}}_{j-1}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2} \right] \right) \left(\frac{x_j}{\Delta_j} - i_j - 1 \right), \quad (11)$$

где

$$D = \frac{1}{r-1} \left(\sum_{j=1}^r f \left[\underbrace{-\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2}}_{j-1}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \dots, -\frac{1}{2} \right] - f \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right] \right). \quad (12)$$

Главным достоинством алгоритмов (3)–(7) и (8)–(12) применительно к многомерным задачам интерполяции являются малые вычислительные затраты на однократное определение функции \tilde{f} , относительно малые необходимые объемы памяти и массива исходных данных.

Действительно, если принять, что значения интерполируемой функции извлекаются из памяти и операции адресации не учитываются, то для однократного вычисления функции \tilde{f} согласно формулам (3)–(7) (при назначении базовой вершины каждый раз заново) требуется примерно $2r + 1$ операций сравнения ($>, <$), $7r + 4$ операций сложения, $6r + 2$ операций умножения и деления, т.е. всего приблизительно $15r$ операций. При фиксированном номере базовой вершины, в частности при использовании во всех элементарных ячейках БВБН (формулы (8)–(12)), число операций еще сокращается примерно до $9r$. Очень важно, что необходимое число операций растет здесь только пропорционально размерности задачи, в то время как при кусочно-линейчатой интерполяции Лагранжа имеет место более чем степенной рост ($3r \cdot 2^r$, см. выше).

Число «задействованных» узлов равномерной сетки при выполнении алгоритмов (3)–(7) и (8)–(12) составляет примерно

$$\frac{r+2}{2^r} \prod_{j=1}^r N_j, \quad (13)$$

где N_j – число узлов равномерной сетки по одной координате.

При $r = 6$ имеем сокращение числа операций по сравнению с неразряженной сеткой в 8 раз, при $r = 10$ – в 85 раз.

Соответственно этому сокращается необходимый объем памяти и необходимый объем исходного экспериментального материала. Правда, последнее реализуется лишь при интегрированной технологии, когда испытания и идентификационные эксперименты увязываются с планируемым методом аппроксимации.

Все эти достоинства очень существенны для практики, однако за них приходится, вообще говоря, платить ценой снижения точности интерполяции. Для того чтобы показать это, обратим еще раз внимание на то, что субъячейки, соответствующие базовой и антибазовой вершинам, при большой размерности r , резко отличаются по объему, и наибольшие ошибки интерполяции следует ожидать в антибазовых субъячейках.

При $r > 2$ центр элементарной ячейки, определяемый координатами

$$x_1 = \left(i_1 + \frac{1}{2} \right) \Delta_1, \quad x_2 = \left(i_2 + \frac{1}{2} \right) \Delta_2, \dots, x_r = \left(i_r + \frac{1}{2} \right) \Delta_r, \quad (14)$$

всегда находится в антибазовой субъячейке.

Подставляя (14) в формулы (6), (7), получаем после преобразований

$$\tilde{f} = \frac{1}{2(r-1)} \left[(r-2) f[-q_1, \dots, -q_r] + \sum_{j=1}^r f[q_1, \dots, q_{j-1}, -q_j, q_{j+1}, \dots, q_r] \right]. \quad (15)$$

Из этого выражения видно, что с ростом r «вклад» значения интерполируемой функции в антибазисной вершине увеличивается, стремясь к 0,5 от общего значения функции \tilde{f} .

Для квадратичной интерполируемой функции

$$f = f_0 + \sum_{j=1}^r \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_0 (x_j - i_j \Delta_j) + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^r \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} \right)_0 (x_j - i_j \Delta_j)(x_k - i_k \Delta_k)$$

ошибка рассматриваемой интерполяции в центре элементарного параллелепипеда при $r > 2$ составляет

$$\delta = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{r-1} \right) \sum_{j \neq k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} \right)_0 \Delta_j \Delta_k + \frac{1}{8} \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \right)_0 \Delta_j^2. \quad (16)$$

Заключение

Сопоставляя эту формулу с формулой ошибки интерполяции Лагранжа

$$\delta = \tilde{f} \left[\left(i_1 + \frac{1}{2} \right) \Delta_1, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} \right) \Delta_r \right] - f \left[\left(i_1 + \frac{1}{2} \right) \Delta_1, \dots, \left(i_r + \frac{1}{2} \right) \Delta_r \right] = \frac{1}{8} \sum_{j \neq k} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k} \right)_0 \Delta_j \Delta_k, \quad (17)$$

(где суммирование ведется по всем значениям j, k от 1 до r за исключением значений $j = k$) для той же средней точки, приходим к заключению, что при больших значениях r величина ошибки по формуле (16) для выпуклой интерполируемой функции превышает величину ошибки по формуле (17) на

$$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \right)_0 \Delta_j^2.$$

Между тем, если применить для той же центральной точки формулу (5) (в этом случае при $r > 2$ эта формула выступает в роли экстраполяционной, а не интерполяционной), то ошибка по абсолютной величине будет точно соответствовать формуле (17), т.е. будет меньше.

Дальнейшее развитие метода содержится в работах Наумова А. И.

Основная идея развития заключается в следующем. В качестве базовой каждый раз выбирается ближайшая к точке (x_1, x_2, \dots, x_r) вершина элементарного параллелепипеда и применяется формула (5). При этом ценой некоторого увеличения вычислительных затрат удастся повысить точность аппроксимации.

Библиографический список

1. Данилов, А. М. Аппроксимационные задачи в подготовке баз данных / А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, В. Н. Шихалеев // Тренажеры и имитаторы : труды семинара. – Пенза, 1990. – С. 11–13.
2. Авиационные тренажеры модульной архитектуры : монография / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина, Б. В. Клюев, Н. К. Юрков ; под ред. Э. В. Лапшина, А. М. Данилова. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 148 с.
3. Разработка системы управления полетом перспективного истребителя с использованием пилотажных моделирующих стендов // Авиастроение. Экспресс-информация. – 1986. – № 25. – С. 10–23.
4. Красовский, А. А. Двойная линеаризация и быстрое численное моделирование нелинейных динамических систем / А. А. Красовский // ДАН СССР. – 1989. – С. 345–348.
5. Красовский, А. А. Математическое моделирование динамики полета летательного аппарата : монография / А. А. Красовский, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков ; под ред. Э. В. Лапшина. – Пенза : Изд-во Пензенского филиала РГУ ИТП, 2008. – 260 с.
6. Кубланов, М. С. Об адекватности математических моделей и задаче идентификации / М. С. Кубланов // Научный Вестник МГТУ ГА. Сер.: Аэромеханика и прочность. – 2009. – № 138. – С. 101–106.
7. Лапшин, Э. В. Исследование информационных процессов, протекающих в тренажерах / Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 87–93.

Лапшин Эдуард Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и
производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: edlapshin@mail.ru

Семочкина Ирина Юриевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Самаров Владимир Владимирович

заместитель начальника
испытательной лаборатории,
ООО «16 НИИЦ»
(141008, Россия, г. Мытищи,
Новомытищинский пр-т, 198)
E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Аннотация. Структура математических моделей объектов, способы аппроксимации (интерполяции) их характеристик, методы и средства идентификации должны быть согласованы между собой и составлять единую информационную технологию, удобную для применения, в частности, в авиационных тренажерах. Вычислительные методы, применяемые при разработке имитаторов авиационных тренажеров, да и других технических средств обучения, можно разделить на общие и специальные. Общие методы представляют собой известные методы вычислительной математики, составляющие один из важнейших разделов прикладной математики вообще. Они реализованы в программном обеспечении универсальных ЭВМ, соответствующих программных «оболочках». В укрупненном виде информационная технология идентификации состоит из следующих этапов: получение исходных экспериментальных и расчетных данных; первичная обработка и создание массива данных; назначение областей аппроксимации в пространствах аргументов; выбор метода аппроксимации и выполнение аппроксимации; разработка рабочих алгоритмов; оценка точности. Идентификация, как правило, требует творчества, носит характер исследования и лишь в редких случаях может быть полностью формализована. Исследовательский итерационный характер носят, в частности, такие этапы, как назначение областей аппроксимации, выбор метода аппроксимации и др.

Ключевые слова: имитаторы авиационных тренажеров, математические модели объектов, способы аппроксимации (интерполяции) их характеристик, методы и средства идентификации, метод аппроксимации.

Lapshin Eduard Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Semochkina Irina Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information technology and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baidukova avenue/Gagarina street,
Penza, Russia)

Samarov Vladimir Vladimirovich

deputy head of test laboratory,
LLC «16 NIITS»
(141008, 198 Novomytischinskiy avenue,
Mytischki, Russia)

Abstract. The structure of the mathematical models of objects, methods of approximation (interpolation) of their characteristics, the methods and means of identification should be agreed among themselves and form a single information technology, convenient to use, in particular, in aircraft simulators. Computational methods used in the development of models of aircraft simulators and other technical teaching aids, can be divided into General and specific. Common methods are well-known methods of computational mathematics that make up one of the most important topics in applied mathematics at all. They are implemented in software on the mainframe, the relevant programme «shells». In the enlarged form of information technology of identification consists of the following stages: baseline experimental and calculated data; primary processing and creation of the data array; designation of areas of approximation in spaces of arguments; the choice of method of approximation and implementation of approximation; develop working algorithms; evaluation of accuracy. Identification usually requires creativity, nature study, and only in rare cases, it may be completely formalized. Iterative research are, inter alia, such as assigning areas of approximation, the choice of method of approximation, etc.

Key words: simulators aviation simulators, mathematical object model, methods of approximation (interpolation) of their characteristics, the methods and means of identification, method of approximation.

УДК 629.7.072.8

Лапшин, Э. В.

Кусочно-линейная интерполяция функций многих аргументов / Э. В. Лапшин, И. Ю. Семочкина, В. В. Самаров // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 42–48. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-6.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621. 384.2

DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-7

ЧАСТОТНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КОММУТАТОРОВ

М. Г. Гасанов, С. Г. Гардашов

Введение

За сравнительно короткую историю развития оптических сетей было разработано огромное число различных типов коммутаторов оптических сигналов, основанных на самых различных физических принципах [1].

Главной задачей оптических коммутаторов является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи [2], эффективность [3] и обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими электронными аналогами. Решение этих задач возможно с применением традиционных механических, электрооптических, термооптических, жидкокристаллических, полупроводниковых, интегрально-оптических, микроэлектромеханических и других устройств.

В настоящее время наряду с другими микродвигателями благодаря простоте конструкции и дешевизне изготовления находят все большее применение твердотельные микропьезоэлектрические двигатели (МПД). Принцип действия МПД основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте (ОПЭ), в них энергия колебательных движений частиц пьезоэлемента (ПЭ), возбуждаемых переменным напряжением, подаваемым на его электроды от ультразвукового генератора (УЗГ) посредством ударного взаимодействия, передается контактирующей с ним подвижной части (ПЧ). Переменным напряжением от УЗГ в ПЭ возбуждаются только продольные колебания по его длине, а в результате его ударного взаимодействия с ПЧ в нем возбуждаются и поперечные (изгибные) колебания [4].

Многоканальный оптический коммутатор

Одним из перспективных путей решения проблемы является применение пьезоэлектрических микроприводов [5], на основе которых возможно создание новых многоканальных, многофункциональных пьезоэлектрических коммутаторов оптических каналов.

Обобщенную схему многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов представим в следующем виде (рис. 1).

Как видно из рис. 1, мультиплексированный в единый оптический сигнал, поступающий из оптического волокна $\sum \lambda_n$, демультиплексируется своим составляющим λ_i посредством управляемого зеркала с помощью специального блока управления пьезоприводом вращательного движения. В данной схеме новизной является узел, созданный сочетанием управляемого зеркала оптического коммутатора с пьезоприводом линейного или вращательного движения.

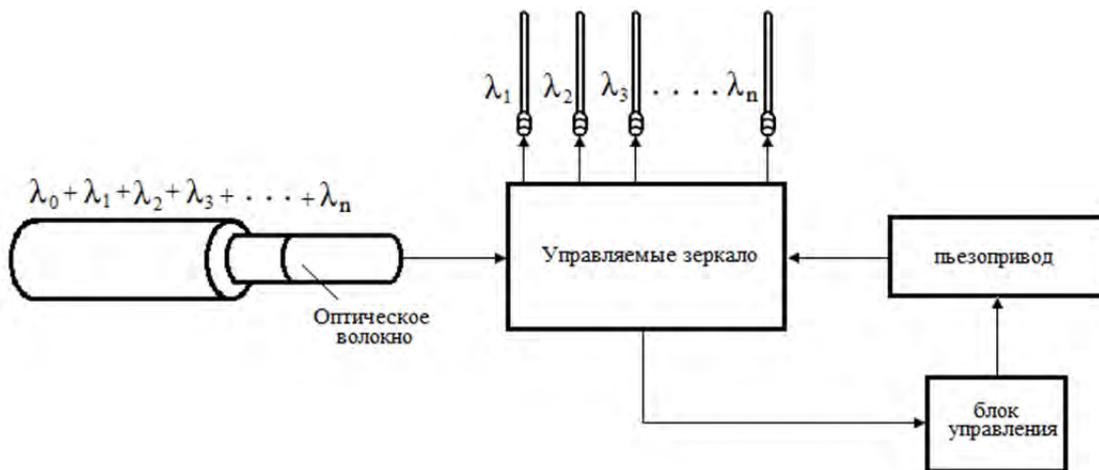


Рис. 1. Обобщенная схема многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов

Применение пьезоэлектрических многоканальных коммутаторов оптических каналов тесно связано с расчетом рабочих характеристик микропьезоэлектрических двигателей и оптимизацией параметров микропьезоэлектрических двигателей.

Частотное согласование размеров элементов пьезоэлектрического двигателя

Показатели качества МПД, кроме прочих факторов, в основном зависят от характера взаимодействия ПЭ с ПЧ и от формы траектории контактирующего с ПЧ конца ПЭ. Известно, что наилучшие показатели качества – сила тяги, быстродействие и КПД. МПД можно получить, когда эта траектория имеет форму эллипса и ПЭ в течение каждого периода колебаний входит в контакт с ПЧ один раз. Для этого частоты продольных и изгибных колебаний ПЭ должны быть равными, фазовый сдвиг между ними должен быть 90° , частота изгибных колебаний ПЧ должна равняться частоте колебаний ПЭ. Выполнение этих условий требует частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ определенным образом. В работе [6] приведены формулы для согласования размеров только ПЭ, обеспечивающие приблизительное равенство частот его продольных и изгибных колебаний без учета его взаимодействия с ПЧ, в результате чего при реальной работе (ПД) эффект согласования снижается.

В работе с целью применения в коммутаторах оптических систем передачи предлагается иная методика, учитывающая взаимодействие ПЭ с ПЧ, применение которой позволяет более точно определить согласованные размеры не только ПЭ, но и ПЧ.

Принципиальная схема рассматриваемого МПД самой простой конструкции показана на рис. 2.

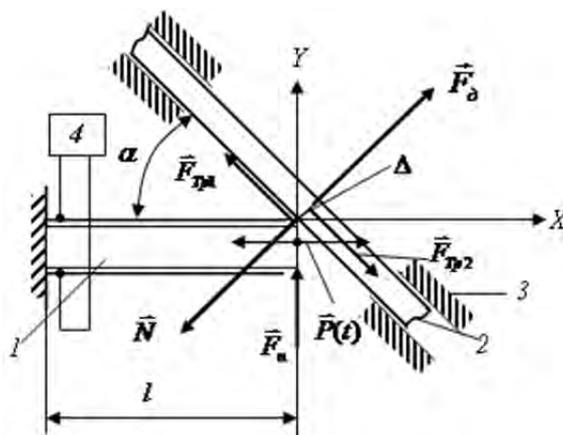


Рис. 2. Принципиальная схема рассматриваемого МПД самой простой конструкции: 1 – пьезоэлемент; 2 – подвижная часть; 3 – направляющие опоры; 4 – ультразвуковой генератор

Один конец ПЭ заделан, а другой свободный конец прижат силой \overline{F}_n под углом α к ПЧ, имеющей возможность двигаться поступательно в направляющих опорах. ПЭ и ПЧ имеют прямоугольные сечения шириной a , a_1 и толщиной b , b_1 соответственно, длина ПЭ l , расстояние между направляющими опорами l_1 .

Динамика взаимодействия ПЭ и ПЧ описывается системой дифференциальных уравнений в операторной форме [7]:

$$\begin{cases} u(t) = L_u(l,s)[P(t) - \Phi_x(u, w, su, sw)]; \\ w(t) = -L_w(l,s)[P_n(t) - \Phi_y(u, w, su, sw)]; \end{cases} \quad (1)$$

где u , w – относительные смещения контактирующих точек ПЭ и ПЧ соответственно по осям x и y , отсчитываемые от их начального неподвижного состояния, $P(t) = a_p \sin \omega t$ – сила, возникающая в результате ОПЭ, приложенная к свободному концу ПЭ, $\omega = 2\pi f$ круговая частота, $s = \partial/\partial t$; Φ_x , Φ_y – проекции нелинейной силы $\overline{\Phi}$ ударного взаимодействия между ПЭ и ПЧ, на осях x и y :

$$\overline{\Phi} = \overline{N} + \overline{F}_{\text{Тр1}}; \quad (2)$$

$$\overline{N} = -\overline{F}_\partial, \quad \overline{F}_{\text{Тр1}} = -\overline{F}_{\text{Тр2}},$$

где \overline{F}_∂ – сила давления на ПЧ, $\overline{F}_{\text{Тр1}}$, $\overline{F}_{\text{Тр2}}$ – силы трения, действующие соответственно на ПЭ и ПЧ.

$L_u(l,s)$, $L_w(l,s)$ – операторы суммарных динамических податливостей контактирующих элементов ПЭ и ПЧ, определяемые при единичной гармонической силе ($a_p = 1$), действующей к свободному концу ПЭ

$$\begin{cases} L_u(l,s) = \frac{l}{ES\xi_u} \left(\text{tg} \xi_u - j \frac{\chi}{4\pi} \frac{0.5 \sin 2\xi_u}{\cos^2 \xi_u} \right), \\ L_w(l,s) = \frac{EI}{l^3} (A + jB) \end{cases} \quad (3)$$

где

$$A = \frac{ch\xi_w \sin \xi_w - sh\xi_w \cos \xi_w}{\xi_w^3 (1 + ch\xi_w \cos \xi_w)}; \quad (4)$$

$$B = \frac{\chi \left[\frac{\xi_w}{2} (ch 2\xi_w - \cos 2\xi_w) + 2\xi_w sh \xi_w \sin \xi_w + (1 + ch \xi_w \cos \xi_w) (ch \xi_w \sin \xi_w - sh \xi_w \cos \xi_w) \right]}{\xi_w^3 (1 + ch \xi_w \cos \xi_w)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости ПЭ; S – площадь поперечного сечения ПЭ; χ – коэффициент поглощения; $I = \frac{1}{12} ab^3$ – момент инерции поперечного сечения ПЭ, $\xi_u = \frac{\omega l}{\gamma}$, $\gamma = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $\xi_w = l \sqrt{\frac{\rho \omega^2 S}{EI}}$; ρ – плотность ПЭ.

Отыскивая решения системы уравнений (1) в виде

$$u(t) = m_u + u^0(t) = m_u + a_u \sin(\omega t - \phi_u), \quad (6)$$

$$w(t) = m_w + w^0(t) = m_w + a_w \sin(\omega t - \phi_w), \quad (7)$$

где m_u , m_w и u^0 , w^0 – постоянные и переменные составляющие $u(t)$ и $w(t)$, производим гармоническую линеаризацию силы ударного взаимодействия [8]:

$$\Phi_x(u, su) \approx m_{Fu}(m_u, a_u) + k_u(m_u, a_u)u^0 + \beta_u(m_u, a_u)su^0; \quad (8)$$

$$\Phi_y(w, sw) \approx m_{Fw}(m_w, a_w) + k_w(m_w, a_w)w^0 + \beta_w(m_w, a_w)sw^0, \quad (9)$$

$m_{Fu}, m_{Fw}, k_u, k_w, \beta_u, \beta_w$ – коэффициенты гармонической линеаризации:

$$m_{Fu} = \frac{a_u}{2\pi} c \sin \alpha [D_u (2 \arcsin D_u - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_u^2}]; \quad (10)$$

$$k_u = \frac{1}{\pi} \left\{ \left[c \sin \alpha \cos \phi_u (\sin \alpha - 2) - \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \phi_u \right] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0,5(c \sin^2 \alpha \cos \phi_u + \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \phi_u)(\pi - 2 \arcsin D_u) \right\}; \quad (11)$$

$$\beta_u = \frac{1}{\pi \omega} \left\{ \left[c \sin \alpha \sin \phi_u (2 - \sin \alpha) - \mu \omega \cos^2 \alpha \cos \phi_u \right] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0,5(\mu \omega \cos^2 \alpha \cos \phi_u - c \sin^2 \alpha \sin \phi_u)(\pi - 2 \arcsin D_u) \right\}; \quad (12)$$

$$m_{Fw} = \frac{a_w}{2\pi} c \cos \alpha \left[D_w (2 \arcsin D_w - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_w^2} \right]; \quad (13)$$

$$k_w = \frac{1}{\pi} \left\{ \left[c \cos \alpha \cos \phi_w (\cos \alpha - 2) - \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \phi_w \right] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0,5(c \cos^2 \alpha \cos \phi_w + \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \phi_w)(\pi - 2 \arcsin D_w) \right\}; \quad (14)$$

$$\beta_w = \frac{1}{\pi \omega} \left\{ \left[c \cos \alpha \sin \phi_w (2 - \cos \alpha) - \mu \omega \sin^2 \alpha \cos \phi_w \right] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0,5(\mu \omega \sin^2 \alpha \cos \phi_w - c \cos^2 \alpha \sin \phi_w)(\pi - 2 \arcsin D_w) \right\}, \quad (15)$$

где c – коэффициент жесткости ПЧ; μ – коэффициент трения между ПЭ и ПЧ,

$$D_u = \frac{\Delta - m_u \sin \alpha}{a_u}, \quad D_w = \frac{\Delta - m_w \cos \alpha}{a_w}, \quad (16)$$

Δ – зазор (натяг) между ПЭ и ПЧ.

Решив систему (1) с учетом (3)–(15), получена система трансцендентных уравнений, определяющая неизвестные параметры искомого решения $m_u, m_w, a_u, a_w, \phi_u, \phi_w$:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_u = \frac{a_p}{\sqrt{U_u^2 + V_u^2}} \\ \phi_u = \arctg \frac{V_u}{U_u} \\ U_w = 0 \\ V_w = 0 \\ m_u = -\frac{l}{ES} m_{Fu} \\ m_w = \frac{l^3}{EI} (F_n - m_{Fw}) \end{array} \right., \quad (17)$$

где

$$U_u = \frac{ES}{l} (\zeta_u \operatorname{ctg} \zeta_u + k_{ul}); \quad (18)$$

$$V_u = \frac{ES}{l} \left(\omega \beta_{ul} + \frac{\chi \zeta_u \zeta_u + 0,5 \sin 2 \zeta_u}{4\pi \sin^2 \zeta_u} \right); \quad (19)$$

$$U_w = \frac{EI}{l^3} \left(\frac{A}{A^2 + B^2} + k_{wl} \right); \quad (20)$$

$$V_w = \frac{EI}{l^3} \left(\frac{B}{A^2 + B^2} + \omega \beta_{wl} \right); \quad (21)$$

$$k_{ul} = \frac{l}{ES} k_u; \beta_{ul} = \frac{l}{ES} \beta_u; k_{wl} = \frac{l^3}{EI} k_w; \beta_{wl} = \frac{l^3}{EI} \beta_w, \quad (22)$$

где U_u, U_w и V_u, V_w – вещественные и мнимые части соответственно суммарных динамических жесткостей W_U, W_W контактирующих элементов ПЭ и ПЧ:

$$\begin{cases} W_U = L_U^{-1}(l, s) + k_u + \beta_u s; \\ W_W = L_W^{-1}(l, s) + k_w + \beta_w s. \end{cases} \quad (23)$$

Для согласования размеров ПЧ выведены следующие формулы:

$$c = 3,2 E_1 a_1 \left(\frac{b_1}{l_1} \right)^3; \quad (24)$$

$$f = 0,68 \frac{b_1}{l_1^2} \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}, \quad (25)$$

где c, f – жесткость и собственная частота изгибных колебаний ПЧ; E_1, ρ_1 – модуль упругости и плотность материала ПЧ.

Предлагается следующий порядок частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ:

- 1) выбираем материалы для ПЭ и ПЧ;
- 2) изменяя в формулах (24), (25) размеры a_1, b_1 и расстояние l_1 между опорами, определяем интервалы допустимых из конструктивных соображений значений жесткости ($c_{\min} \div c_{\max}$) и собственной частоты изгибных колебаний ($f_{\min} \div f_{\max}$) ПЧ;
- 3) для конкретного значения c , взятого из указанного в п. 2 интервала, согласуем размеры ПЭ, т.е. изменяя размеры a, b, l ПЭ, добиваемся равенства собственных частот продольных и изгибных колебаний по длине ПЭ. С этой целью используем уравнения, определяющие совокупность этих собственных частот:

$$\begin{cases} U_u = U_u'(f, l) + U_u''(f, a, b, l, D_u, c) = 0; \\ U_w = U_w'(f, l) + U_w''(f, a, b, l, D_w, c) = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Рекомендуется решать систему уравнений (26) графически, построением с помощью компьютера в одной системе координат графиков функций $U_u'(f)$ и $-U_u''(f)$, а в другой – графиков $U_w'(f)$ и $-U_w''(f)$, на которых будут наглядно видны все моды собственных частот.

С учетом условия $\phi_u - \phi_w = 90^0$, $\phi_u = 90^0$ графики $U_u''(f)$ и $U_w''(f)$ представляют собой прямые, угловые коэффициенты которых при заданных c, μ, α зависят соответственно только от D_u и D_w . Так как $|D_u| \leq 1$ и $|D_w| \leq 1$, эти уравнения решаем только для значений: $D_u = -1, D_u = 1$ и $D_w = -1, D_w = 1$. Решение для других значений D_u и D_w будут между полученными выше решениями. Довольно легко достигается равенство первой моды собственных частот продольных колебаний и второй моды собственных частот изгибных колебаний. Фиксируем D_u и D_w , при которых $f = f_u = f_w$. Полученная частота должна входить в допустимый интервал (п. 2). В противном случае, изменив c, a, b, l , необходимо повторить расчет по п. 2, 3;

4) подставив частоту $f = f_u = f_w$ в выражения $a_u = |L_u(l, s)|$ и $a_w = |L_w(l, s)|$, определяем начальные приближенные значения a_u, a_w ;

5) решаем систему из четырех уравнений, полученную из (17) с учетом $f = f_u = f_w$, начальные значения $a_u, a_w, \phi_u = 90^\circ, \phi_w = 0, U_u = 0, U_w = 0$ и $a_p = 1$ относительно a_u, m_u, a_w, m_w ;

6) используя результаты п. 5, по (16) уточняем D_u и D_w , согласно п. 3 скорректируем частоту $f = f_u = f_w$;

7) согласуем размеры ПЧ. Подставив $f = f_u = f_w$ из п. 6 в (25), определяем отношение $\frac{b_1}{l_1^2}$.

Задавая значением $b_1 \leq a_1$, определяем l_1 . Наконец из формулы (24) определяем a_1 . С точки зрения наилучшей передачи энергии от ПЭ к ПЧ, желательно выполнение условия

$$a \leq a_1.$$

Заключение

В соответствии с изложенным можно заключить, что согласованные по этой методике размеры пьезоэлемента и подвижной части полностью обеспечивают вышеуказанный режим работы микропьезоэлектрических двигателей с наилучшими показателями качества с целью применения в коммутаторах оптических каналов.

Библиографический список

1. Гайворовская, Г. С. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях / Г. С. Гайворовская, А. В. Рябцов // *Applicable Information Models*. – 2011. – № 22. – Р. 169–181.
2. Гайворовская, Г. С. Особенности коммутации оптических сигналов при использовании различных режимов переноса информации / Г. С. Гайворовская, А. В. Рябцов. – 2015. – С. 1–7. – URL: <http://journals.urau.ru/reftech/article/viewFile/51945/52999>
3. Гасанов, М. Г. Эффективность пьезоэлектрического дефлектора светового луча в технике связи / М. Г. Гасанов // *Известия АзГУ*. – 2010. – № 2 (66). – С. 44–46.
4. Hasanov, M. H. Application of piezoelectric light beam deflector in optical commutators of fiber-optical communication networks / M. H. Hasanov, V. A. Maharramov // *The international science-technical journal HEARD of the Azerbaijan Engineering Academy*. – 2017. – Vol. 9, № 2. – Р. 116–121.
5. А.С. СССР № 1827708. Пьезоэлектрический реверсивный привод / Гасанов М. Г., Вишневский В. С. – 1995.
6. Джагулов, Р. Г. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике / Р. Г. Джагулов, А. А. Ерофеев. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 165 с.
7. Постановка и выбор метода решения задачи исследования динамики виброударного взаимодействия в пьезоэлектрическом двигателе / С. Г. Гардашов, Т. Б. Гурбанов, Х. Г. Гардашова, Э. Т. Газарханов, Т. И. Кяримли // *Елми мяжмуяляр*. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 36–40.
8. Гардашов, С. Г. Гармоническая линеаризация силы ударного взаимодействия в ПД / С. Г. Гардашов, Т. Б. Гурбанов, Х. Г. Гардашова // *Елми ясярляр – Фундаментал елмляр*. – 2003. – № 3, том II (7). – С. 20–24.

Гасанов Мехман Гусейн оглы

кандидат технических наук, доцент,
кафедра многоканальных
телекоммуникационных систем,
Азербайджанский технический университет
(Az1148, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25)
Email: mhasanovnew@gmail.com

Гардашов Садраддин Гудбиддин оглы

старший преподаватель,
кафедра электромеханики
и электрического оборудования,
Азербайджанский технический университет
(Az1148, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25)
Email: sqardashov52@mail.ru

Hasanov Mehman Huseyn

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of multi-channel
telecommunication systems,
Azerbaijan Technical University,
(Az1148, 25 G. Javida avenue, Baku, Azerbaijan)

Gardashov Sadraddin Gudbiddin

senior teacher,
sub-department of electrical engineering
and electrical equipment,
Azerbaijan Technical University,
(Az1148, 25 G. Javida avenue, Baku, Azerbaijan)

Аннотация. *Актуальность и цели.* Основной задачей оптических коммутаторов является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи, эффективность и обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими оптоэлектронными аналогами. *Материалы и методы.* Одним из перспективных путей решения проблемы является применение пьезоэлектрических микроприводов, на основе которых предложено создание многоканального, многофункционального пьезоэлектрического коммутатора оптических каналов. Применение пьезоэлектрических многоканальных коммутаторов оптических каналов тесно связано с расчетом рабочих характеристик микропьезоэлектрических двигателей и оптимизацией параметров микропьезоэлектрических двигателей. *Результаты.* Согласованные по этой методике размеры пьезоэлемента и подвижной части полностью обеспечивают режим работы микропьезоэлектрического двигателя с наилучшими показателями качества с целью применения в коммутаторах оптических каналов. *Выводы.* Представлена обобщенная схема многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов. Предложена методика частотного согласования размеров элементов микропьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов.

Ключевые слова: оптический коммутатор, пьезоэлектрический эффект, продольные и изгибные колебания, микропьезоэлектрический привод, многоканальный коммутатор, управляющее устройство, оптические волокно, пьезоэлемент.

Abstract. *Background.* The main task of optical switches is to ensure the highest possible speed for the terabit optical communication lines being developed, the efficiency and the provision of the lowest possible unit cost, as well as the reduction of power consumption in comparison with existing optoelectronic analogues. *Materials and methods.* One of the promising ways to solve the problem is the use of piezoelectric microdrives, on the basis of which the creation of a multichannel multifunctional piezoelectric switch for optical channels is proposed. The use of piezoelectric multichannel switches for optical channels is closely related to the calculation of the performance of micro-piezoelectric motors and the optimization of the parameters of micro-piezoelectric motors. *Results.* The sizes of the piezoelement and the moving part coordinated in this way fully provide the operating mode for micro-piezoelectric motors with the best quality indicators for the purpose of using optical channels in switches. *Conclusions.* A generalized scheme of a multichannel commutator with the use of micro-piezoelectric drives for switching optical channels is presented. A technique for frequency matching of the sizes of elements of a micro-piezoelectric engine for optical commutators is proposed.

Key words: optical commutator, piezoelectric effect, longitudinal and bending vibrations, micro-piezoelectric drive, optical commutator, multichannel switch, control device, optical fiber, piezoelectric element.

УДК 621.384.2

Гасанов, М. Г.

Частотное согласование размеров элементов пьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов / М. Г. Гасанов, С. Г. Гардашов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 49–55. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-7.

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

А. В. Подгавский, В. П. Буц, Н. К. Юрков

Введение

В ходе решения множества навигационных задач организации траектории движения и управления применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) часто возникает вопрос о достаточности ресурсов по управлению достижению тех или иных областей координатного пространства из текущего (заданного) состояния и, если такие границы достижимы, то какой тогда вид имеет и сама траектория движения объекта? Положение в определенной мере может еще осложняться отказами датчиков информации, органов управления или двигателей БЛА. Для оператора, управляющего поврежденным БЛА с мобильного наземного пункта управления (НПУ), необходимо и важно знать оставшиеся возможности БЛА для выполнения маневров, связанных с поиском различных объектов-целей и т.п. В связи с этим представляется решение весьма актуальной задачи разработки информационных моделей и рациональных алгоритмов, позволяющих в реальном масштабе времени осуществлять решение задачи для траекторного анализа. Принципиально, такое решение задачи возможно с использованием известных методов оптимального управления (ОУ) [1–3]. Подробный анализ каждого из достаточно хорошо известных подходов является достаточно трудоемкой научной проблемой и не входит в проблематику исследования настоящей работы. В данной работе рассматриваются только те особенности, которые послужили источником применения прямой (непосредственной) оптимизации и автоматизированных процедур неградиентного случайного поиска (НСП) в моделях управления движением подвижных объектов (ПО), в частности роботов – БЛА [1, 2, 4, 5].

Для большинства традиционных методов, реализующих основные положения теории классического вариационного исчисления [6–9], задача траекторного анализа в условиях множества нелинейных дифференциальных связей и ограничений типа неравенств представляется практически неразрешимой и особенно в реальном масштабе времени. Принцип максимума Л. С. Понтрягина, как известно, позволяет, в частности, решать задачи ОУ с нелинейными ограничениями в форме неравенств. Множество областей использования и полученные в них результаты свидетельствуют о достаточно высокой эффективности данного метода, и в то же время решение многих прикладных задач свидетельствует о том, что численная реализация принципа максимума в задачах ОУ сталкивается с многими проблемами. Необходимость одновременного решения основной и сопряженной систем дифференциальных уравнений, которые в большинстве своем являются нелинейными, приводит к значительному возрастанию затрат машинного времени и потребных резервов оперативной памяти компьютера. Например, только при увеличении вдвое размерности матрицы, определяемой основной и сопряженной системами, затраты времени вычислений возрастают приблизительно в 8 раз, т.е. пропорционально кубу увеличения размерности. Альтернативой предлагаемого подхода является прямая оптимизация, взгляд на проблему решения задач траекторного анализа и оптимального управления, в частности траекторных и пилотажных задач полета БЛА. В данном случае полагается, что оптимизационное решение может быть получено в результате вариации производной допустимой опорной функции координат вектора состояния (классическое вариационное исчисление использует в этих целях вариацию непосредственно функции координат вектора состояния, а принцип максимума Л. С. Понтрягина – вариацию управления). Данный принцип позволяет в процессе решения вычислительной задачи избавиться от необходимости многократного интегрирования прямой и сопряженной систем нелинейных дифференциальных уравнений. Получение реализуемого управления ПО осуществляется за один цикл интегрирования динамической системы. В основу прямой оптимизации положен принцип вариации функций производных вектора состояния для опорного решения [2, 3].

Задача оптимизации управления подвижным объектом

Рассмотрим, как введение данного принципа сказывается на характере получаемых в результате его применения оптимальных траекторий. Можно предположить, что при неизменности заданного пространства решений изменение типа функций, по которым осуществляется дифференцирование целевой функции, не должно приводить к изменению вида оптимальных траекторий. Для доказательства этого высказывания воспользуемся следующим рассуждением. Традиционно считается [1–4], что основой для классического вариационного исчисления является уравнение Эйлера. Вывод этого уравнения нестрогим конечно-разностным методом опирается на принятое в математическом анализе допущение о том, что экстремальное значение функционала для произвольной кривой линии может быть получено на основе ее аппроксимации, прямолинейными звеньями с заданными абсциссами их концов. При этом частные производные функционала по ординатам вершин звеньев должны быть равными нулю. Изменим данное допущение предположением, что экстремум заданного функционала достигается на аналогичной кривой, на которой равны нулю его частные производные по производным функции от координаты состояния. Затем применим это допущение в процессе вывода необходимого условия экстремальности функционала. Необходимое условие экстремальности произвольной целевой функции будем проводить нестрогим конечно-разностным методом. Для этого рассмотрим критерий, заданный в виде общепринятого в вычислительной практике функционала [1–4]

$$J[x(t)] = \int_t^{t_b} F(t, x, \dot{x}) \cdot dt, \tag{1}$$

где $x(t_n) = a, x(t_k) = b, t$ – независимая переменная.

Искать оптимальное значение функционала (1) следует на ломаных, составленных из конечного числа n звеньев с заданными абсциссами вершин

$$t_n + \Delta t, t_n + 2\Delta t, \dots, t_n + (n - 1)\Delta t, \tag{2}$$

где $\Delta t = (t_k - t_n)n^{-1}$.

В этом случае функционал J превращается в функцию $n-1$ переменных – ординат x_1, x_2, \dots, x_{n-1} и задача определения его экстремума сводится к задаче отыскания такого набора этих переменных, на котором в соответствии с принятым допущением достигаются

$$\partial J / \partial \dot{x}_1 = 0, \partial J / \partial \dot{x}_2 = 0, \dots, \partial J / \partial \dot{x}_{n-1} = 0. \tag{3}$$

Решая систему (3), найдем те значения $x_i (i = 1, \dots, n - 1)$, при которых функционал J может достигнуть экстремального значения. Для получения необходимого решения проведем следующие необходимые операции. Представим значение заданного функционала (1) в виде приближенной интегральной суммы

$$J[x(t)] = \sum_{i=0}^n J_1[x_i(t)], \tag{4}$$

$$J_i[x_i(t)] = \int_{t_i}^{t_{i+1}} F\left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}\right) dt \approx F\left(t_i, x_i, \frac{\Delta x_i}{\Delta t}\right) \Delta t. \tag{5}$$

Выражение (4) может быть преобразовано к виду

$$J[x(t)] \approx \sum_{i=0}^n F\left(t_i, x_i, \frac{\Delta x_i}{\Delta t}\right) \cdot \Delta t. \tag{6}$$

Следующим шагом рассмотрим частные производные функционала $J[x(t)]$ по независимым переменным \dot{x}_i . Далее следует то, что от i -й производной в (6) зависят

$$J_i = F\left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}\right) \Delta t; J_{i-1} = F\left(t_{i-1}, x_{i-1}, \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t}\right) \Delta t. \tag{7}$$

Условным выражением для частной производной исходного функционала по переменной \dot{x}_i ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) является

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \dot{x}_i} &= \frac{\partial J}{\partial \dot{x}_i} + \left(\frac{\partial J}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial x_i}{\partial \dot{x}_i} \right) + \left(\frac{\partial J}{\partial \dot{x}_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{\partial \dot{x}_{i-1}}{\partial \dot{x}_i} \right) = \\ &= \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i} \left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \right) \right] \cdot \Delta t + \left[\frac{\partial F}{\partial x_i} \left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial x_i}{\partial \dot{x}_i} \right) \cdot \Delta t + \\ &\quad + \left[\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_{i-1}} \left(t_{i-1}, x_{i-1}, \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right) \right] \cdot \left(\frac{\partial \dot{x}_{i-1}}{\partial \dot{x}_i} \right) \cdot \Delta t = \\ &= F_{\dot{x}_i} \left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \right) \cdot \Delta t + F_{x_i} \left(t_i, x_i, \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \right) \cdot (-1) \cdot \Delta t + F_{\dot{x}_{i-1}} \left(t_{i-1}, x_{i-1}, \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \right) \cdot (-1) \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (8)$$

Сокращая слагаемые конечного выражения (8) на $-\Delta t^2$ и приравнивая найденную производную к нулю, получим очередное выражение

$$F_{x_i} \left(t_i, x_i, \Delta x_i / \Delta t \right) - \frac{F_{\dot{x}_i} \left(t_i, x_i, \Delta x_i / \Delta t \right) - F_{\dot{x}_{i-1}} \left(t_{i-1}, x_{i-1}, \Delta x_{i-1} / \Delta t \right)}{\Delta t} = 0$$

или

$$F_{x_i} \left(t_i, x_i, \Delta x_i / \Delta t \right) - \Delta F_{\dot{x}_i} / \Delta t = 0, \quad (9)$$

($i = 1, 2, \dots, n - 1$).

При выводе выражения (8) были произведены подстановки в виде

$$\frac{\partial x_i}{\partial \dot{x}_i} = -\Delta t, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \dot{x}_{i-1}}{\partial \dot{x}_i} = -1. \quad (11)$$

Рациональность формулы (10) может быть проиллюстрирована на примере, на котором приращение координаты опорной траектории и ее производной различаются по знаку, а их отношение пропорционально шагу интегрирования, а замена (11) имеет геометрический смысл. Так как в каждый момент времени t_i варьируется только положение i -й точки траектории, а точки, соответствующие времени t_{i-1} и t_{i+1} , фиксированы, произвольное приращение производной $\partial \dot{x}_{i-1}$ вызывает равное по модулю и противоположное по знаку приращение производной $\partial \dot{x}_i$. Решение системы (9) относительно компонент x_i ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) позволяет определить множество значений $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$, при которых функционал (1) принимает экстремальное значение. Устремляя число разбиений $n \rightarrow \infty$, получим последовательность из $X^* = \{x_1, x_2, \dots\}$, которой может быть поставлена в соответствие бесконечная последовательность $\{J_j\}$. Если предел этой последовательности существует, он может быть искомым экстремумом функционала (1). Предположим, что рассматриваемые вышеперечисленные функции F и \dot{x} обладают необходимыми свойствами непрерывности и дифференцируемости по соответствующим аргументам. В выражении для (9) возможен предельный переход при $n \rightarrow \infty$, в итоге

$$F_x(t, x, \dot{x}) - d[F_{\dot{x}}(t, x, \dot{x})] / dt = 0. \quad (12)$$

Таким образом, равенство (12) согласовывается с предположением об адекватности подходов теории вариационного вычисления и прямой оптимизации.

Решение задачи оптимального управления подвижным объектом

На рис. 1 отображены оптимальные траектории движения БЛА в горизонтальной плоскости наведения, полученные в результате решения задачи на «быстрый разворот» принципом максимума Л. С. Понтрягина (за оптимизируемое управление здесь принималась скорость угла крена

$d\gamma/dt$ БЛА) и прямым методом оптимизации. Уравнения для подвижного объекта представляли зависимости вида [4, 5]

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{H} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \theta \cos \varphi \\ V \sin \theta \\ V \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(n_x - \sin \theta) \\ g(n_x \cos \gamma - \cos \theta) V \\ -g n_y \sin \gamma [V \cos \theta]^{-1} \end{bmatrix}. \quad (14)$$



Рис. 1. Схематизация решения задачи на быстрый разворот БЛА

На функции управления по крену и продольной перегрузки накладывались условные ограничения типа неравенств. В практике они обусловлены не только эксплуатационными значениями, но и влиянием механических повреждений или отказов в системе управления подвижного объекта [3, 4].

Далее рассмотрим решение задачи управления БЛА методом прямой оптимизации.

Классическое решение задачи на быстродействие представляет следующий алгоритм. Имеется управляемая динамическая система, в которой управление реализует $u \in U = \{u : (u \leq 1)\}$, $\forall t \in [0, t_k]$, а краевые условия имеют следующий вид [1–4]:

$$x(0) = -4, x(t_k) = 0, y(0) = 4, y(t_k) = 0. \quad (15)$$

Функционал в данной задаче задается как минимум величины времени окончания движения объекта как материальной точки в виде

$$J(x(\cdot), t_k) = t_k \rightarrow \inf. \quad (16)$$

Из теории принципа максимума [1–3] следует, что решение поставленной задачи существует и оно единственно. Задача в данном случае не требует доопределения по фазовым координатам и их первой производной, поскольку множество краевых условий является полным, за исключением значений управляющих функций в моменты времени t_n и t_k . В общем случае эти значения

включаются в число варьируемых параметров и находятся из условия экстремума функционала J . Смысл исходной задачи и предположение о наличии переключения управления по траектории движения позволяют сразу выбрать управление в виде $u(0) = -1, u(t_k) = 1$. В соответствии с общим подходом [4] в прямой оптимизации вид функции приращения управлений для рассматриваемой задачи определяется динамической системой

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = u, \end{cases} \quad (17)$$

схема вычисления приращений управлений может быть записана как система разностных уравнений вида

$$\begin{cases} \Delta y_i = 2 \frac{(x_k - x_i)}{(t_k - t_i)} - (y_i + y_k), \\ \Delta u_i = 0,5 \left(\frac{\Delta y_i}{h(t_i)} - u_i + u_k \right). \end{cases} \quad (18)$$

«Сжимаемая» последовательно временной интервал, получаем, что $t_k = 8$. Решая данные системы при $t_k = 8, u(0) = -1, u(t_k) = 1, h(t_i) = 0,5 \cdot (t_k - t_i)$, получим управление и траекторию, практически совпадающие с приведенными ранее аналитическими зависимостями. Вычисленные невязки по-прежнему практически равны нулю, а значения функционалов в данной задаче совпадают по определению. Так как условие равенства численного и аналитического функционалов при допустимом значении невязки выполнено, можно говорить об адекватности двух представленных подходов к решению исходной задачи. Как и в траекторном контуре, проведем декомпозицию системы уравнений, описывающих движение в пилотажном контуре модели системы управления (СУ) БЛА, а также построим систему управления, базирующуюся на основных принципах в прямой оптимизации [1, 2].

Информационную модель движения представим как [2]

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \varpi_z - tg \beta (\varpi_x \cos \alpha - \varpi_y \sin \alpha) - \frac{g}{V \cos \beta} [(n_x \sin \alpha + n_y \cos \alpha) - \\ &\quad - (\sin \vartheta \sin \alpha + \cos \vartheta \cos \gamma \cos \alpha)]; \\ \dot{\beta} &= (\varpi_x \sin \alpha + \varpi_y \cos \alpha) - \frac{g}{V} \{ [(n_x \cos \alpha - n_y \sin \alpha) \sin \beta - n_z \cos \beta] - \\ &\quad - [(\sin \vartheta \cos \alpha - \cos \vartheta \cos \gamma \sin \alpha) \sin \beta + \cos \vartheta \sin \gamma \cos \beta] \}; \\ \dot{\gamma} &= \varpi_x - tg \vartheta (\varpi_y \cos \gamma - \varpi_z \sin \gamma); \\ \dot{\varpi}_x &= \frac{I_{yy}}{\Delta} M_x + \frac{I_{xy}}{\Delta} M_y + \frac{I_{yy} (I_{yy} - I_{zz}) + I_{xy}^2}{\Delta} \varpi_y \varpi_z - \frac{I_{xy} (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})}{\Delta} \varpi_x \varpi_z; \\ \dot{\varpi}_y &= \frac{I_{xx}}{\Delta} M_y + \frac{I_{xy}}{\Delta} M_x + \frac{I_{xx} (I_{xx} - I_{zz}) - I_{xy}^2}{\Delta} \varpi_x \varpi_z + \frac{I_{xy} (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})}{\Delta} \varpi_y \varpi_z; \\ \dot{\varpi}_z &= \frac{1}{I_{zz}} M_z - \frac{I_{yy} - I_{xx}}{I_{zz}} \varpi_x \varpi_y + \frac{I_{xy}}{I_{zz}} (\varpi_x^2 - \varpi_y^2). \end{aligned} \quad (19)$$

Представим уравнения, входящие в (19), в виде двухуровневой иерархии из системы уравнений. Первый уровень иерархии представляет модель вида

$$\dot{\mu} = \Psi(\mu, \eta), \quad (20)$$

где $\mu = [\alpha, \beta, \gamma, V]^T$ – вектор состояния рассматриваемой системы; $\eta = [\varpi_z, \varpi_y, \varpi_x, n_x]^T$ – вектор псевдоуправлений. После разложения в ряд Тейлора система (20) примет вид

$$\dot{\mu}_k = \Psi(\mu_{k-1}, \eta_{k-1}) + \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \mu^T} \right|_{k-1} \Delta \mu_{k-1} + \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \eta^T} \right|_{k-1} \Delta \eta_{k-1}. \quad (21)$$

Приращением для вектора псевдоуправления на каждом шаге является

$$\Delta \eta_{k-1} = \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \eta^T} \right|_{k-1}^{-1} \left(\dot{\mu}_k - \Psi(\mu_{k-1}, \eta_{k-1}) - \left. \frac{\partial \Psi}{\partial \mu^T} \right|_{k-1} \Delta \mu_{k-1} \right), \quad (22)$$

где $\dot{\mu}_k = \frac{\mu_k - \mu(t_{k-1})}{h_\mu}$ – требуемый средний вектор скорости, определяемый на каждом шаге из условия достижения системой состояния μ_k .

Здесь решается краевая задача, как и в случае с траекторным контуром, описанным ранее, но в отличие от траекторного контура μ_k не является свободной координатой и задается исходя из необходимости решения задач, поставленных перед ней траекторным контуром. Интенсивность же управления h_μ задается исходя из получения приемлемого качества переходного процесса в ходе решения задачи. Рассматривая короткопериодическое движение и считая, что μ_k является свободной координатой, решаем краевую задачу в пилотажном контуре. Последующая модель в уровне иерархии представлена контуром моделирования угловых скоростей, который описывается уравнением

$$\dot{\varpi} = \Omega(\varpi, M), \quad (23)$$

где $\varpi = [\varpi_x, \varpi_y, \varpi_z, n_x]^T$ – вектор состояния динамической системы; $M = [M_x, M_y, M_z, R, \varphi_r]^T$ – вектор управлений. После разложения динамической системы в ряд Тейлора, она принимает вид

$$\dot{\varpi}_k = \Omega(\varpi_{k-1}, M_{k-1}) + \left. \frac{\partial \Omega}{\partial \varpi^T} \right|_{k-1} \Delta \varpi_{k-1} + \left. \frac{\partial \Omega}{\partial M^T} \right|_{k-1} \Delta M_{k-1}. \quad (24)$$

Приращение для вектора управления объекта на каждом шаге определяется:

$$\Delta M_{k-1} = \left. \frac{\partial \Omega}{\partial M^T} \right|_{k-1}^{-1} \left(\dot{\varpi}_k - \Omega(\varpi_{k-1}, M_{k-1}) - \left. \frac{\partial \Omega}{\partial \varpi^T} \right|_{k-1} \Delta \varpi_{k-1} \right), \quad (25)$$

где $\dot{\varpi}_k = \left[\frac{\Delta \omega_{xk}}{h_\varpi}, \frac{\Delta \omega_{yk}}{h_\varpi}, \frac{\Delta \omega_{zk}}{h_\varpi}, \frac{\Delta n_x}{h_\omega} \right]^T$ – требуемый средний вектор скорости, определяемый на

каждом шаге из получения решения для уравнения (25); h_ω – интенсивность управления, определяется из дополнительного условия. Интенсивность управления определяет характер переходного процесса в динамической системе. Изменяя h_ω , мы в состоянии получить практически весь диапазон переходных процессов для информационной модели объекта. На практике интенсивность управления выбирается либо из условия получения приемлемого переходного процесса, либо из условия решения оптимизационной задачи. Отметим, что интенсивность управления в информационной модели БЛА для каждой координаты вектора $\dot{\varpi}_k$ может подбираться индивидуально в зависимости от режима движения робота – полета БЛА. Полученные приращения для моментов в уравнении пересчитываются в отклонения рулевых органов СУ БЛА. На рис. 1 показано одно из частных решений оптимизационной задачи траекторного управления БЛА в горизонтальной плоскости его движения.

Библиографический список

1. Казаков, И. Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояний / И. Е. Казаков. – М. : Наука, 1975.
2. Казаков, И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И. Е. Казаков. – М. : Наука, 1977.
3. Красовский, А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский, Ю. А. Вавилов. – М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986.
4. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987.
5. Казаков, И. Е. Анализ стохастических систем в пространстве состояний / И. Е. Казаков, С. В. Мальчиков. – М. : Наука, 1983.
6. Полтавский, А. В. Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский // Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
7. Полтавский, А. В. Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
8. Казаков, И. Е. Авиационные управляемые ракеты / И. Е. Казаков, А. Ф. Мишаков. – М. : Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1985. – Ч. 2.
9. Пат. РФ № 2302030. Адаптивная СУ БЛА по крену и тангажу / Полтавский А. В. – 2007.

Полтавский Александр Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатизации образования,
Институт математики, информатики
и естественных наук,
Московский государственный
педагогический университет;
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Буц Виктор Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Poltavskiy Aleksandr Vasil'evich

doctor of technical sciences,
Professor of «Informatization of Education» Institute of
Mathematics, Informatics and Natural Sciences,
Moscow State Pedagogical University;
leading researcher,
ICS RAS named after V. A. Trapeznikov
(117997, Россия 65 Profsoyuznaya street,
Moscow, Russia)

Buts Viktor Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показано, что в ходе решения задач организации траектории движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) часто возникает вопрос о достаточности ресурсов по управлению с целью достижения тех или иных областей координатного пространства. Следует определить вид траектории движения объекта для выхода БЛА из текущего (заданного) состояния в заданную точку при условии нахождения управле-

Abstract. *Background.* It is shown that in the course of solving the problems of organizing the trajectory of unmanned aerial vehicles (UAVs), the question often arises of the adequacy of control resources in order to achieve certain areas of the coordinate space. It is necessary to determine the type of the object's trajectory for the output of the UAV from the current (specified) state to a given point, provided that controls are located within the specified boundaries. The problem of developing

ний в заданных границах. Ставится и решается задача разработки информационных моделей и рациональных алгоритмов, позволяющих в реальном масштабе времени осуществлять решение задачи для траекторного анализа. *Материалы и методы.* В ходе решения поставленной задачи рассматриваются только те особенности, которые послужили источником применения прямой (непосредственной) оптимизации и автоматизированных процедур неградиентного случайного поиска в моделях управления движением подвижных объектов. *Результаты.* Решена задача оптимизации управления подвижным объектом на «быстрый разворот» согласно принципу максимума Л. С. Понтрягина. Показано, что интенсивность управления определяет характер переходного процесса в динамической системе, причем интенсивность управления в информационной модели БЛА для каждой координаты вектора должна подбираться индивидуально в зависимости от режима полета БЛА. *Выводы.* Дан один из подходов поиска оптимального управления при имитационном моделировании и поиска характеристик подвижных объектов.

Ключевые слова: комплекс с БЛА, состав, структура, система.

information models and rational algorithms that allow realizing the solution of the problem for trajectory analysis is put and is being solved. *Materials and methods.* In the course of solving the task posed, only those features that have served as a source of application of direct (immediate) optimization and automated procedures of non-gradient random search in motion control models of mobile objects are considered. *Results.* The problem of optimizing the control of a moving object for a "fast turn" is solved in accordance with the maximum principle of L. S. Pontryagin. It is shown that the control intensity determines the nature of the transient process in the dynamic system, and the control intensity in the UAV information model for each vector coordinate must be selected individually depending on the UAV flight mode. *Conclusions.* One of the approaches to finding the optimal control in simulation simulation and searching for characteristics of moving objects is given.

Key words: UAV complex, composition, weaponry.

УДК 658.286:621.868.2

Полтавский, А. В.

Информационное моделирование в задачах поиска управления подвижным объектом / А. В. Полтавский, В. П. Буц, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 56–63. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-8.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ГРУППЫ КВАДРОКОПТЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МОНИТОРИНГА ОБЛАСТИ¹

А. И. Дивеев, Н. Б. Конырбаев

Введение

В настоящий период для мониторинга различных областей все чаще используются летающие роботы – квадрокоптеры. Их задачей является пролет через некоторые заданные точки в пространстве по наиболее оптимальным траекториям, съемка и контрольные измерения необходимых характеристик с помощью определенных датчиков. При разработке системы управления группой квадрокоптеров одной из важнейших задач является распределение заданных точек в пространстве между квадрокоптерами так, чтобы пути движения квадрокоптеров были оптимальными, например, по критерию суммарной длины всех траекторий. Количество контролируемых точек области, их положение и количество квадрокоптеров может меняться в зависимости от типа контроля и реальных технических условий.

Задача распределения точек между квадрокоптерами по критерию минимальной суммарной длины траектории является усложненной трехмерной задачей коммивояжера, точнее трехмерной задачей группы коммивояжеров. Данная задача относится к классу NP-трудных задач [1–4], для решения которых не известны алгоритмы с полиномиальной скоростью сходимости. Алгоритм для поиска точного оптимального решения требует количество вычислений критерия качества, пропорциональное факториалу от количества точек, поэтому при количестве точек, равном нескольким десяткам, точное решение задачи группы коммивояжеров не может быть получено современными вычислительными средствами. В настоящей работе для решения задачи используем вариационный генетический алгоритм. В отличие от классического генетического алгоритма вариационный генетический алгоритм использует принцип малых вариаций базисного решения [5–8] и выполняет все генетические операции на конечных множествах векторов, кодирующих малые вариации.

Применение в задаче группы коммивояжеров вместо одного коммивояжера усложняет формулу для вычисления суммарной длины пути. В задаче мы предполагаем, что все коммивояжеры, в нашем случае это квадрокоптеры, должны стартовать из одной точки и в нее же вернуться, при этом к суммарной длине пути, пройденной всеми квадрокоптерами, добавляем длины отрезков, которые проходят квадрокоптеры из начальной точки к первой точке своего пути и из последней точки своего пути в исходную точку. В работе рассматриваем различные виды малых вариаций и приводим пример решения задач для группы из четырех коммивояжеров.

Постановка задачи

Задано упорядоченное множество из N точек в трехмерном пространстве

$$P = (\mathbf{p}^1 = [x_1 \ y_1 \ z_1]^T, \dots, \mathbf{p}^N = [x_N \ y_N \ z_N]^T). \quad (1)$$

Задано число $K < N$ коммивояжеров-агентов.

Заданы координаты начальной точки

$$\mathbf{p}^0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T. \quad (2)$$

Каждый агент, кроме последнего, проходит

$$m = [N / K] \quad (3)$$

точек, где $[A]$ – целая часть числа A .

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-29-04224-офи_м, 17-08-01203-а).

Последний агент проходит

$$N - m(K - 1) \quad (4)$$

точек.

Необходимо переупорядочить точки во множестве (1) так, чтобы минимизировать следующую целевую функцию:

$$J(\tilde{\mathbf{P}}) = \sum_{i=1}^{K-1} \left(\|\tilde{\mathbf{p}}^{(i-1)m+1} - \mathbf{p}^0\| + \sum_{j=2}^m \|\tilde{\mathbf{p}}^{(i-1)m+j} - \tilde{\mathbf{p}}^{(i-1)m+j-1}\| + \|\mathbf{p}^0 - \tilde{\mathbf{p}}^{im}\| \right) + \\ + \|\tilde{\mathbf{p}}^{(K-1)m+1} - \mathbf{p}^0\| + \sum_{j=2}^{N-m(K-1)} \|\tilde{\mathbf{p}}^{(K-1)m+j} - \tilde{\mathbf{p}}^{(K-1)m+j-1}\| + \|\mathbf{p}^0 - \tilde{\mathbf{p}}^N\|, \quad (5)$$

где $\tilde{\mathbf{p}}^k$ – новые координаты точки k после переупорядочивания,

$$\|\mathbf{p}^i - \mathbf{p}^j\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (6)$$

В целевой функции (5) первое слагаемое указывает на суммарную длину пути, пройденного $K - 1$ коммивояжерами, поскольку они проходят одинаковое количество точек. Последние три слагаемых указывают на длину пути, пройденного последним K -м коммивояжером. Исходная точка \mathbf{p}^0 не меняет своих координат, поэтому из последней пройденной точки каждый коммивояжер должен вернуться в исходную точку и пройти путь от своей последней точки до исходной точки, что может повлиять на суммарную длину пути коммивояжеров.

Вариационный генетический алгоритм

Для решения задачи (1)–(6) группы коммивояжеров используем вариационный генетический алгоритм. Определим в задаче малые вариации возможного решения. Для описания малой вариации используем целочисленный вектор из двух компонент

$$\mathbf{w} = [w_1 \quad w_2]^T, \quad (7)$$

где w_1, w_2 – номера позиций в упорядоченном множестве точек (1), подвергаемых вариации.

Определим две малые вариации: вариация обмена и вариация вставки.

При вариации обмена точки в позициях w_1 и w_2 меняются местами. Пусть $\mathbf{P} = (\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^N)$ – порядок точек до вариации, тогда после вариации (7) получаем

$$\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{w} \circ \mathbf{P} = \underbrace{(\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^{w_1-1}, \mathbf{p}^{w_2}, \mathbf{p}^{w_1+1}, \dots, \mathbf{p}^{w_2-1}, \mathbf{p}^{w_1}, \mathbf{p}^{w_2+1}, \dots, \mathbf{p}^N)}_{w_1}. \quad (8)$$

При вариации вставки точка из позиции w_1 исключается и вставляется в позицию w_2 , а остальные точки сдвигаются в сторону нахождения позиции w_1 . При реализации вариации вставки важно знать условие, какая из позиций больше: w_1 или w_2 . Пусть $w_1 < w_2$, тогда вариация вставки осуществляется по формуле

$$\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{w} \circ \mathbf{P} = \underbrace{(\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^{w_1-1}, \mathbf{p}^{w_1+1}, \mathbf{p}^{w_1+2}, \dots, \mathbf{p}^{w_2-1}, \mathbf{p}^{w_2}, \mathbf{p}^{w_1}, \mathbf{p}^{w_2+1}, \dots, \mathbf{p}^N)}_{w_1}. \quad (9)$$

При условии $w_1 > w_2$ вариация вставки выполняется по формуле

$$\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{w} \circ \mathbf{P} = \underbrace{(\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^{w_2-1}, \mathbf{p}^{w_1}, \mathbf{p}^{w_2}, \mathbf{p}^{w_2+1}, \dots, \mathbf{p}^{w_1-1}, \mathbf{p}^{w_1+1}, \dots, \mathbf{p}^N)}_{w_2}. \quad (10)$$

При условии равенства позиций $w_1 = w_2 = w$ вариации обмена и вставки не выполняются или точнее не меняют позиций элементов варьируемого множества: $[w \ w]^T \circ P = P$.

Для организации поиска оптимального решения по критерию (5) с помощью генетического алгоритма введем определение кода возможного решения как совокупность базисного решения (1) и упорядоченного множества векторов вариаций

$$W_j = (\mathbf{w}^{j,1}, \dots, \mathbf{w}^{j,L}), \quad (11)$$

где $\mathbf{w}^{j,k} = [w_1^{j,k} \ w_2^{j,k}]^T$, $k=1, \dots, L$.

Возможное решение \tilde{P}_j получается из базового решения с помощью последовательно выполненных вариаций, указанных во всех векторах упорядоченного множества W_j векторов вариаций (11):

$$\tilde{P}_j = \mathbf{w}^{j,L} \circ \mathbf{w}^{j,L-1} \dots \circ \mathbf{w}^{j,1} \circ P. \quad (12)$$

Начальное множество возможных решений в генетическом алгоритме представляет собой множество упорядоченных множеств векторов вариаций

$$W = \{W_0, W_1, \dots, W_H\}, \quad (13)$$

здесь W_0 – множество векторов вариаций с одинаковыми значениями первой и второй компонент, поэтому данное множество вариаций не меняет базисного решения или соответствует базисному решению. Каждый элемент W_j , $j=1, \dots, H$, из множества (13) вместе с базисным возможным решением соответствует возможному решению P_j , после выполнения всех вариаций, описываемых входящими в это множество векторами.

Рассмотрим пример. Пусть задано базисное решение в виде множества точек

$$P = (\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^{12}).$$

Пусть во множестве возможных решений имеем следующее множество векторов вариаций с малой вариацией обмена

$$W_j = \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 5 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 8 \\ 3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 11 \\ 2 \end{bmatrix} \right).$$

Тогда возможное решение, соответствующее данному множеству, будет иметь вид

$$P(j) = \begin{bmatrix} 11 \\ 2 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 8 \\ 3 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1 \\ 5 \end{bmatrix} \circ P = (\mathbf{p}^5, \mathbf{p}^{11}, \mathbf{p}^8, \mathbf{p}^1, \mathbf{p}^1, \mathbf{p}^2, \mathbf{p}^7, \mathbf{p}^3, \mathbf{p}^9, \mathbf{p}^{10}, \mathbf{p}^6, \mathbf{p}^{12}).$$

Генетические операции скрещивания и мутации выполняем на множествах векторов вариаций. Для выполнения операции скрещивания отбираем два возможных решения (родителя)

$$W_i = (\mathbf{w}^{i,1}, \dots, \mathbf{w}^{i,L}), \quad W_j = (\mathbf{w}^{j,1}, \dots, \mathbf{w}^{j,L}), \quad i, j \in \{0, 1, \dots, H\}.$$

Находим точку скрещивания $\chi \in \{1, \dots, L\}$ и обмениваем вектора вариаций после точки скрещивания в отобранных множествах-родителях. Получаем два новых возможных решения

$$W_{H+1} = (\mathbf{w}^{i,1}, \dots, \mathbf{w}^{i,\chi}, \mathbf{w}^{j,\chi+1}, \dots, \mathbf{w}^{j,L}), \quad (14)$$

$$W_{H+2} = (\mathbf{w}^{j,1}, \dots, \mathbf{w}^{j,\chi}, \mathbf{w}^{i,\chi+1}, \dots, \mathbf{w}^{i,L}). \quad (15)$$

Далее согласно классическому генетическому алгоритму в новых полученных решениях с заданной вероятностью p_μ выполняем операцию мутации. Находим точку мутации $\mu \in \{1, \dots, L\}$ в новом возможном решении и генерируем новый вектор вариаций в позиции μ

$$\mathbf{W}_{H+1} = (\mathbf{w}^{H+1,1}, \dots, \mathbf{w}^{H+1,\mu-1}, \mathbf{w}^{H+1,\mu}, \mathbf{w}^{H+1,\mu+1}, \dots, \mathbf{w}^{j,L}), \quad (16)$$

где $\mathbf{w}^{H+1,\mu}$ – новый вектор вариаций, $\mathbf{w}^{H+1,\mu} = [w_1^{H+1,\mu} \quad w_2^{H+1,\mu}]^T$, $w_1^{H+1,\mu}, w_2^{H+1,\mu} \in \{1, \dots, N\}$.

То же повторяем и для второго возможного решения. После этого оцениваем новые полученные решения по формуле вычисления целевой функции (5). После этого в соответствии с выбранными правилами генетического алгоритма принимаем решение о включении новых возможных решений во множество возможных решений. Согласно правилам построения генетического алгоритма новые возможные решения либо всегда включаются во множество возможных решений, при этом множество расширяется, а затем после нескольких скрещиваний происходит отсев наихудших возможных решений, либо после включения каждого нового возможного решения происходит исключение наихудшего возможного решения, при этом количество элементов во множестве возможных решений не меняется.

После прохождения заданного количества циклов генерации новых возможных решений в последнем полученном множестве возможных решений находим наилучшее по значению целевой функции возможное решение, которое представляет собой найденное решение задачи.

В вариационном генетическом алгоритме существенную роль играет выбор базисного решения. Для выбора базисного решения в задаче коммивояжера целесообразно использовать жадный алгоритм, который отбирает ближайшую точку из неотобранных ранее точек. Пусть S – множество отобранных точек, R – множество неотобранных точек. На первом шаге имеем $S(\mathbf{p}^0) = \{\mathbf{p}^0\}$, $R^{(0)} = \{\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^N\}$, где в обозначении множества отобранных точек в скобках указывается последняя отобранная точка. Верхний индекс в обозначении множества неотобранных точек указывает на количество отобранных точек. Далее находим

$$S(\mathbf{p}^{\alpha_1}) = S(\mathbf{p}^0) \cup \{\mathbf{p}^{\alpha_1}\} = \{\mathbf{p}^0, \mathbf{p}^{\alpha_1}\},$$

$$R^{(1)} = R^{(0)} \setminus \{\mathbf{p}^{\alpha_1}\} = \{\mathbf{p}^1, \dots, \mathbf{p}^{\alpha_1-1}, \mathbf{p}^{\alpha_1+1}, \dots, \mathbf{p}^N\},$$

где

$$\|\mathbf{p}^{\alpha_1} - \mathbf{p}^0\| = \min_j \{\|\mathbf{p}^j - \mathbf{p}^0\| : j = 1, \dots, N\}.$$

Жадный отбор выполняем на основании соотношений

$$S(\mathbf{p}^{\alpha_k}) = S(\mathbf{p}^{\alpha_{k-1}}) \cup \{\mathbf{p}^{\alpha_k}\} = \{\mathbf{p}^0, \mathbf{p}^{\alpha_1}, \dots, \mathbf{p}^{\alpha_k}\}, \quad (17)$$

$$R^{(k)} = R^{(k-1)} \setminus \{\mathbf{p}^{\alpha_k}\}, \quad (18)$$

$$\|\mathbf{p}^{\alpha_k} - \mathbf{p}^0\| = \min_j \{\|\mathbf{p}^j - \mathbf{p}^0\| : \forall \mathbf{p}^j \in R^{(k-1)}\}, \quad k = 1, \dots, N. \quad (19)$$

В результате получаем

$$S(\mathbf{p}^{\alpha_N}) = \tilde{P}, \quad R^{(N)} = \emptyset.$$

Существенным условием успешной работы вариационного генетического алгоритма является периодическая замена базисного решения на лучшее найденное к этому моменту решение. Смену базисного решения осуществляем после выполнения определенного количества циклов воспроизведения новых возможных решений. После смены базисного решения сами возможные решения, кроме базисного, и их оценки изменятся, причем не обязательно в лучшую сторону. Этап смены базисного решения называем сменой эпохи.

Вычислительный эксперимент

В качестве примера рассмотрим задачу для группы из $K = 4$ квадрокоптеров и $N = 200$ точек со случайно сгенерированными координатами из диапазонов: $x \in [-200; 200]$, $y \in [-1; 50]$, $z \in [-200; 200]$. Начальной и конечной точкой всех траекторий должна быть точка начала координат

$$\mathbf{p}^0 = [0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

На рис. 1, а–в приведены проекции траекторий движения всех квадрокоптеров по неупорядоченным точкам.

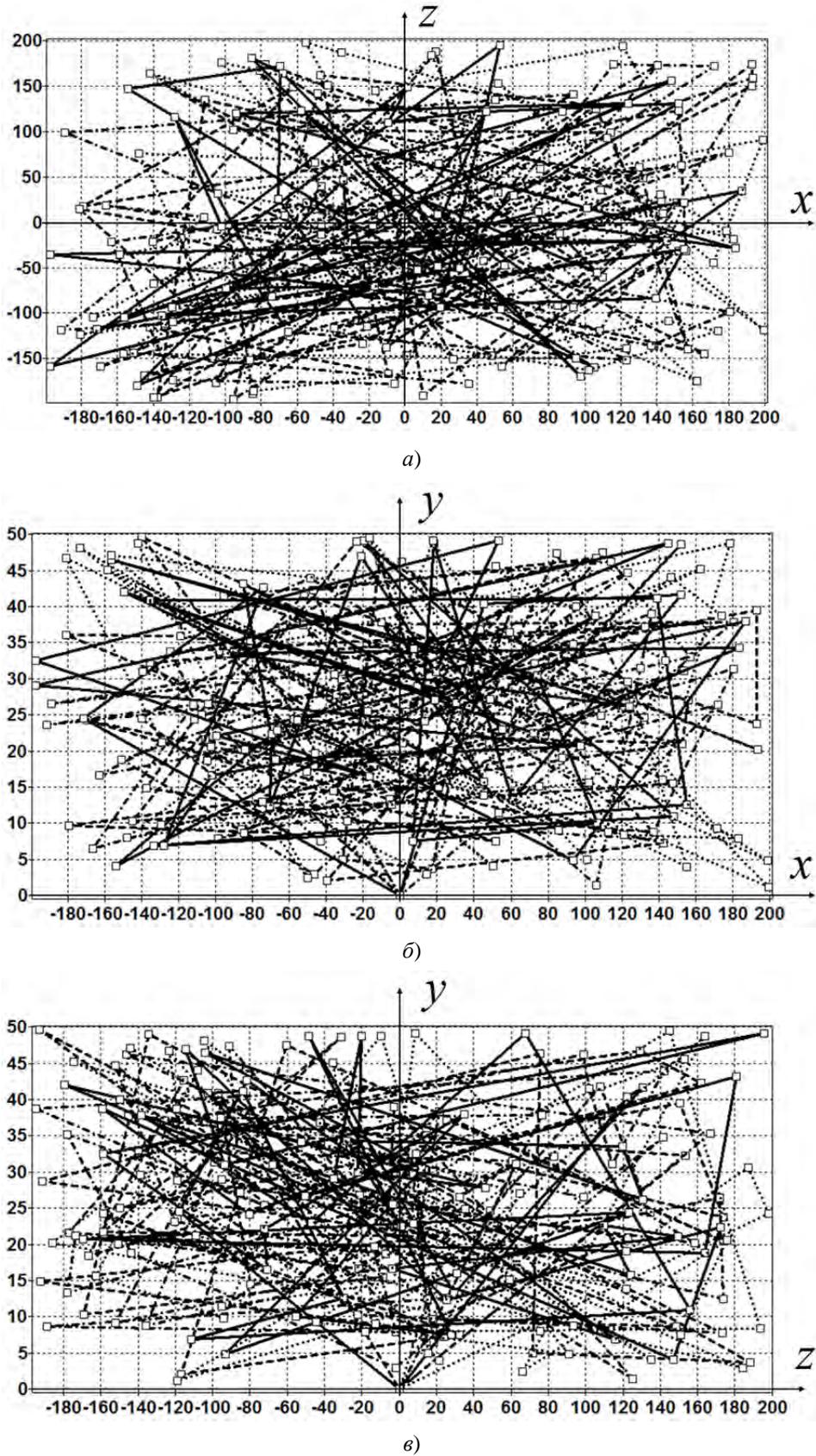
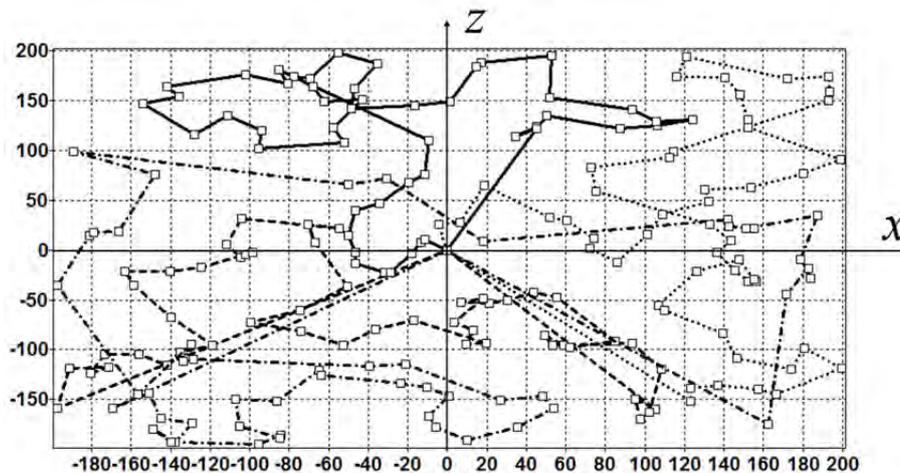


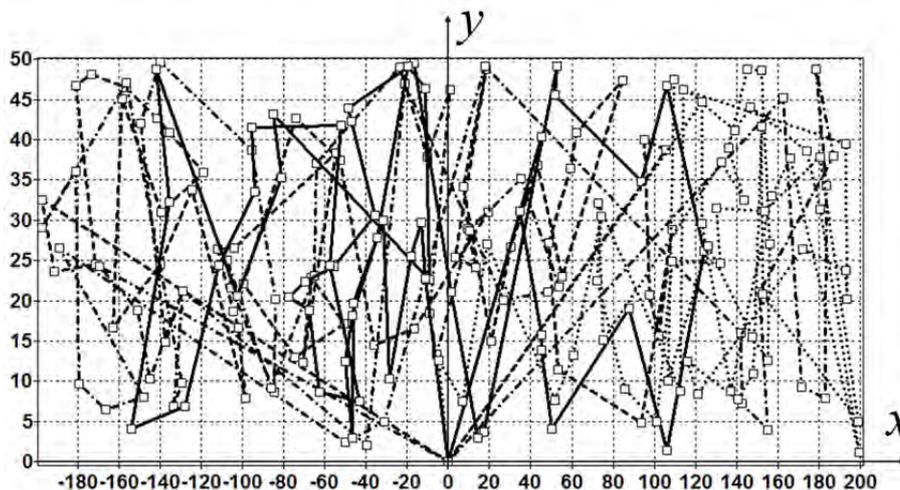
Рис. 1. Проекция траекторий движения квадрокоптеров по неупорядоченным точкам

Общая длина всех траекторий по неупорядоченным точкам составила величину 40 935, первый квадрокоптер прошел 9945, второй 9997, третий 10 729 и четвертый 10 264.

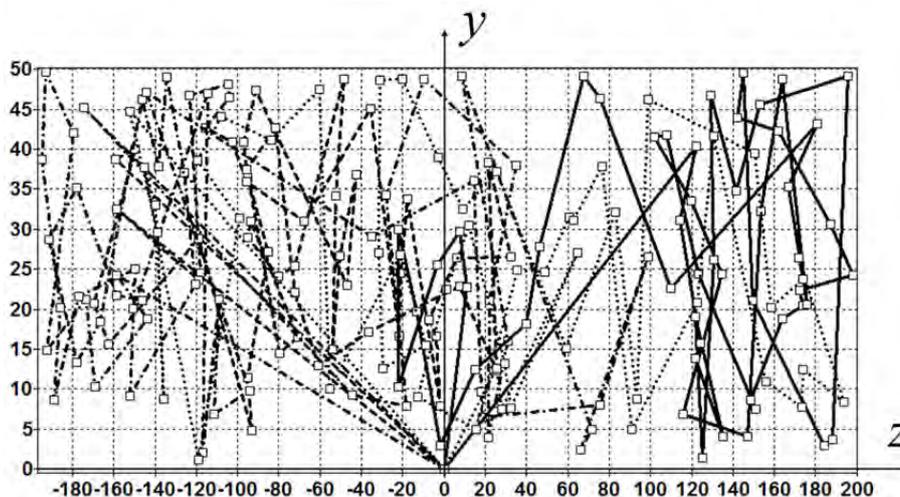
На рис. 2, а–в приведены проекции траекторий базисного решения, полученного жадным алгоритмом.



а)



б)



в)

Рис. 2. Проекция траекторий базисного решения

После применения жадного алгоритма получили суммарную длину всех траекторий 7420, первый квадрокоптер прошел 1525, второй 1730, третий 1720, четвертый 2445.

Далее использовали вариационный генетический алгоритм с малой вариацией вставки со следующими параметрами: мощность множества возможных решений 1024, количество поколений 512, количество возможных скрещиваний в одном поколении 256, количество векторов вариаций в одном возможном решении 12, вероятность мутации 0,8, количество поколений между сменой базисного решения 16.

Проекции полученных траекторий приведены на рис. 3, а–в.

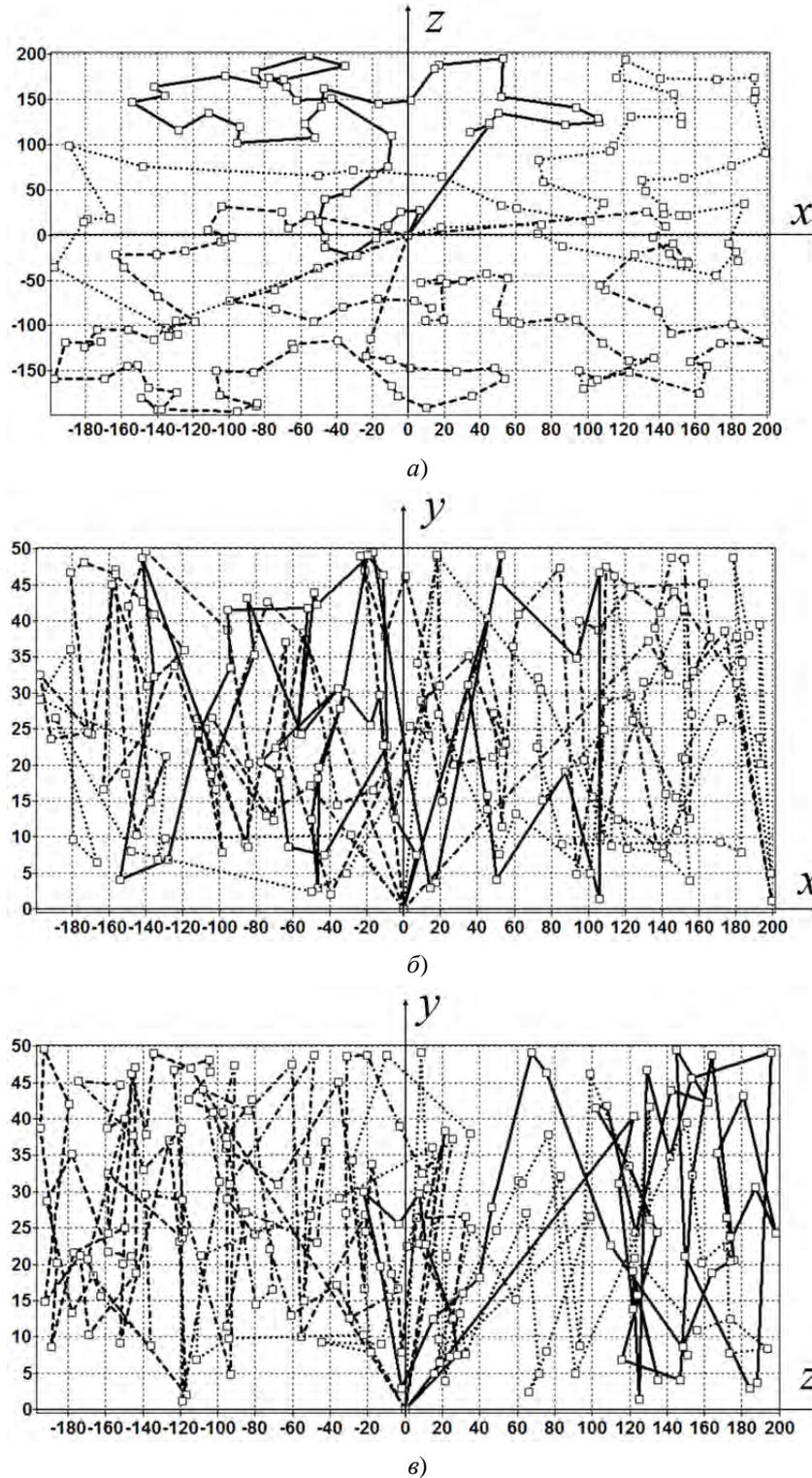


Рис. 3. Проекция траекторий после использования вариационного генетического алгоритма

В результате получили общую суммарную длину всех траекторий 6368, что более, чем в 6 раз меньше исходной траектории и на 16 % меньше, чем длины траектории, полученной жадным алгоритмом. Первый квадрокоптер прошел 1484, второй квадрокоптер 1950, третий квадрокоптер 1444, четвертый 1490.

Заключение

Рассмотрена задача поиска оптимальных траекторий для группы квадрокоптеров, которая отличается от задачи коммивояжера тем, что пути движения проходят в трехмерном пространстве и все точки необходимо распределить для каждого квадрокоптера. Предложено для решения задачи использовать вариационный генетический алгоритм с малыми вариациями обмена и вставки. Приведено подробное описание вариационного генетического алгоритма и предложено для поиска базисного решения использовать жадный алгоритм.

Приведен численный пример решения задачи для группы квадрокоптеров вариационным генетическим алгоритмом. Найденное решение дает суммарный путь в 6 раз короче, чем первоначальный путь и на 16 % короче пути, найденного жадным алгоритмом.

Библиографический список

1. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М. : Мир, 1982. – 168 с.
2. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М : Мир, 1978. – 189 с.
3. Кормен, Т. Алгоритмы. Построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2009. – 257 с.
4. Пападимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М. : Мир, 1985. – 216 с.
5. Дивеев, А. И. Вариационный генетический алгоритм для решения задачи оптимального управления / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: <http://www.science-education.ru/115-11474>
6. Diveev, A. I. Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization / A. I. Diveev // Proceedings of 16th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, CAO' 2015 (October 6th–9th). – Garmisch-Partenkirchen, 2015. – P. 28–33.
7. Дивеев, А. И. Вариационный генетический алгоритм для поиска оптимального управления космическим аппаратом / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Труды одиннадцатого международного симпозиума Интеллектуальные системы INTELS'2014 (Москва, 30 июня – 4 июля) ; под ред. К. А. Пупкова. – М., 2014. – С. 83–88.
8. Diveev, A. I. Synthesis of Control for Group of Quadrotors in Task of Area Monitoring / A. I. Diveev, S. I. Ibadulla, N. B. Konyrbaev, E. Yu. Shmalko // Proceedings The 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2017) (20–22 September). – Moscow, 2017. – Vol. 1. – P. 365–370.

Дивеев Асхат Ибрагимович

доктор технических наук,
начальник сектора отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук,
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);
профессор департамента механики
и мехатроники Инженерной академии Российского
университета дружбы народов
E-mail: aidiveev@mail.ru

Diveev Askhat Ibragimovich

doctor of technical sciences,
chief of the division of safety and nonlinear analysis,
Federal research center
«Computer science and control»
of the Russian Academy of Sciences
(Dorodnicyn Computer Center of RAS)
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia);
Professor of the department of Mechanics and mecha-
tronics in RUDN University

Конырбаев Нурбек Беркинбайулы

стажер,
департамент механики и мехатроники,
Инженерная академия
Российского университета дружбы народов
(115419, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)
E-mail: n.konyrbaev@mail.ru

Konyrbaev Nurbek Berkinbayuly

trainee,
department of mechanics and mechatronics,
Engineering Academy
of Russian University of friendship of peoples
(115419, 6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

Аннотация. Работа посвящена решению задачи поиска оптимальных траекторий для мониторинга области с помощью группы квадрокоптеров. Показано, что данная задача сводится к трехмерной задаче группы коммивояжеров и является NP-трудной, для которой не известно алгоритмов с полиномиальной скоростью сходимости. Предложено для решения задачи использовать вариационный генетический алгоритм с малыми вариациями обмена и вставки. Приведено подробное описание вариационного генетического алгоритма для решения задачи группы коммивояжеров. Для эффективного использования принципа малых вариаций необходимо построение базисного решения с наиболее близкой к оптимальной оценкой целевой функции. Для построения базисного решения предложено использовать жадный алгоритм. В вычислительном эксперименте рассмотрена задача поиска путей для четырех квадрокоптеров, которые должны начать движение из одной точки пройти в сумме по двумстам точкам и вернуться обратно в начальную точку. С помощью предложенного вариационного генетического алгоритма найдены оптимальные траектории для каждого квадрокоптера. Суммарная длина найденных траекторий более чем в 6 раз короче первоначальной траектории и на 16 % короче траектории базисного решения, найденного жадным алгоритмом.

Ключевые слова: трехмерная задача коммивояжера, группа квадрокоптеров, вариационный генетический алгоритм, NP-трудная задача.

Abstract. The paper is devoted to the solution of a problem of search of optimum trajectories for monitoring of area by means of group of quadrotors. It is shown that this task comes down to a three-dimensional problem of group of travelling salesmen representatives and is NP-hard and this problem doesn't have an algorithm for search solution with a polynomial speed of convergence. It is offered for the solution of this problem to use a variational genetic algorithm with small variations of exchange and an insert. The detailed description of a variation genetic algorithm for the solution of a task of group of travelling salesmen is provided. Effective use of the principle of small variations requires creation of the basic decision with the closest to optimum assessment of criterion function. For creation of the basic decision it is offered to use a greedy algorithm. In a computing experiment the problem of search of ways for four quadrotors which have to begin to undergo the movement from one point to pass in the sum two hundred points is considered, and to return back to the initial point. By means of the offered variation genetic algorithm optimum trajectories for each quadrotor are found. Total length of the found trajectories shorter in 6 times then an initial trajectory and less on 16 percent of the trajectory of the basic solution found by a greedy algorithm.

Key words: three dimensional travelling salesmen problem, group of quadrotors, variational genetic algorithm, NP-hard problem.

УДК 519.618

Дивеев, А. И.

Эволюционный метод решения задачи группы квадрокоптеров для повышения качества мониторинга области / А. И. Дивеев, Н. Б. Конырбаев // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 64–72. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-9.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКТНОГО МЕНЕДЖМЕНТА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ: ПОДХОД И ФОРМАЛЬНЫЙ АППАРАТ¹

В. В. Быстров, А. В. Маслобоев, В. А. Путилов

Введение

В последние годы вопросам обеспечения безопасности в различных сферах на разных уровнях государственного управления уделяется особое внимание. Особенно остро проблемы безопасности проявляются на региональном уровне. Поэтому именно сегодня назрела объективная необходимость в разработке и внедрении в области государственного управления средств поддержки принятия решений нового поколения, включая обучаемые нейронные сети, профессиональные социальные сети, мультиагентные и киберфизические (виртуальные) системы. Однако эта задача еще далека от эффективного решения.

Успешное внедрение современных информационных систем и технологий, высокая степень автоматизации процессов принятия управленческих решений предоставляют новые возможности для повышения эффективности процессов управления безопасностью сложных социально-экономических объектов, к которым относятся региональные системы.

Современные средства информационной поддержки управления безопасностью социально-экономических систем зачастую оказываются функционально ограниченными и не всегда обеспечивают субъектов управления полной и аналитически обоснованной информацией о состоянии развития этих систем для принятия эффективных управленческих решений, особенно в условиях кризисных ситуаций в социально-экономической сфере. Очевидно, что устранение этих противоречий на практике представляет собой достаточно важную задачу и, в свою очередь, требует разработки единой и конструктивной теории, позволяющей с общих методологических позиций оценивать существующее положение дел в области управления безопасностью региональных социально-экономических систем (далее – региональной безопасностью). Трудностей добавляет отсутствие формализованной постановки проблемы управления региональной безопасностью и формального аппарата для комплексного решения этой проблемы. Такие ключевые факторы в совокупности обуславливают необходимость проработки широкого круга вопросов, связанных с моделированием данной предметной области и с автоматизацией синтеза гибких систем управления региональной безопасностью.

Работа посвящена развитию теоретических основ управления безопасностью сложных систем в части разработки методологии информационной поддержки принятия решений в сфере обеспечения безопасности региональных социально-экономических систем, а также в части создания формального аппарата и средств автоматизации управления в этой области.

Понятийный аппарат и теоретические основы исследования

К настоящему времени не сложилось однозначного определения региональной безопасности. Каждый исследователь вкладывает в него тот смысл, который наиболее близок к его сфере научных интересов. Многие исследователи связывают региональную безопасность с понятием устойчивого развития и применяют его к различным территориальным образованиям (регионам, странам и их частям).

В широком понимании безопасность означает функционирование определенных компонентов социально-экономической системы в благоприятных условиях. Однако в реальной жизни всегда существуют угрозы и опасности различной природы, которые необходимо учитывать при управлении сложной системой. В связи с этим обеспечение безопасности проявляется в способ-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант 15-07-04290-а.

ности общества и государства противостоять им, адекватно реагировать или минимизировать их негативные последствия [1].

На государственном уровне понятие «безопасность» в современной России было определено в Федеральном законе «О безопасности» от 5 марта 1992 г. как «состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз» [2]. Многие эксперты отмечают, что с каждым годом границы между внутренними и внешними угрозами стираются как следствие активной интеграции Российской Федерации в мировое сообщество.

В работе термин «региональная безопасность» определяется авторами как состояние защищенности региональной системы, при котором действие внешних (глобальных) и внутренних (локальных) факторов не приводит к ухудшению или к невозможности ее функционирования и развития [3].

Стоит отметить, что принятие решений в области обеспечения региональной безопасности является сложной и трудоемкой задачей, требующей привлечения экспертов из разных областей знаний, обработку разнородной многомерной информации, построение прогнозов для различных сценариев развития региона. Современные информационные технологии и системы поддержки принятия решения в сфере региональной безопасности ориентированы на снижение сложности и ресурсопотребления задач управления, а также на повышение качества принимаемых решений.

Одним из вариантов создания информационных технологий и средств поддержки принятия решений в сфере управления региональной безопасностью является использование имитационного моделирования. Комплексы проблемно-ориентированных имитационных моделей применяются для прогнозирования возможных вариантов развития ситуации в регионе в зависимости от заданных сценарных условий. Полученный прогноз дает аналитическую информацию, предназначенную для последующего анализа и выработки рекомендаций для принятия обоснованных решений.

Основная идея работы заключается в рассмотрении мероприятия, тем или иным образом приводящего к изменению состояния региональной безопасности, как отдельного проекта в терминах проектного менеджмента.

На сегодняшний день проектный менеджмент является достаточно проработанной областью знаний, проблемами которой занимаются как научно-исследовательские коллективы [4–9], так и различные ассоциации предприятий и организаций в России и за рубежом. Значимым фактом, подтверждающим высокую степень детализации проектного менеджмента, является разработка и внедрение в деятельность хозяйствующих субъектов соответствующих международных стандартов (ISO 21500:2014 «Управление проектами», руководство PMBOK v.4, методология IPMA, методология PRINCE2 и др.) [10, 11]. Данные стандарты регламентируют основные процессы, их процедуры проведения и участников в рамках выполнения отдельного проекта или совокупности проектов.

Практика применения теории управления проектами показала, что существуют определенные проблемы при внедрении ее принципов в деятельность конкретных предприятий. Основные из них заключаются в принятии недостаточно обоснованных управленческих решений относительно выбора и назначения исполнителей на выполнение отдельных работ по проекту, а также наличие несовпадающих целевых установок у различных заинтересованных лиц. При поддержке принятия решений в задачах управления проектом используются, как правило, модели оптимального назначения, где в качестве исходных данных используются сведения о сроках и длительности реализации и необходимых для этого ресурсов, которые по факту могут быть изменены в случае использования иных подходов к выполнению. При этом эффективное использование на практике таких моделей является достаточно проблематичным из-за необходимости комплексного учета дополнительных факторов, способных оказать значительное влияние на ход и качество выполнения проектных работ [6].

Под проектом понимается ограниченное во времени целенаправленное изменение отдельной системы с установленными требованиями к качеству результатов, возможными рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией [7].

Проект в сфере обеспечения региональной безопасности – комплекс антикризисных мероприятий, проводимых субъектами регионального управления и заинтересованными лицами

с целью получения определенных результатов требуемого качества, непосредственно или опосредованно влияющих на состояние социально-экономического развития региона с учетом ограничений на использование различного типа ресурсов (временных, финансовых, кадровых, материальных и др.). Цели определяются на основе анализа принятой стратегии социально-экономического развития региона и текущих проблем регионального развития.

Примерами проектов в сфере экономической безопасности исследуемого региона (Мурманской области) являются формирование эффективных инновационных структур, ориентированных на создание социально значимых объектов на территории Мурманской области, а также сети малых инновационных предприятий и научно-образовательных структур для поддержки устойчивого развития моногородов Севера России.

Жизненный цикл проекта – установленная последовательность фаз от начала до завершения проекта.

Стейкхолдер, или заинтересованное лицо, – лицо, принимающее решение, или организационная структура, которые могут участвовать в выполнении проекта или оказывать воздействие на ход его реализации, реализуя тем самым ту или иную программу управления.

Жизненный цикл управления проектом – последовательность выполнения определенных задач управления, каждой из которых соответствует конкретная фаза жизненного цикла проекта.

Управление проектами – область деятельности, в ходе которой определяются и достигаются четкие цели проекта при балансировании между объемом работ, ресурсами, временем, качеством и рисками.

Существуют различные классификации проектов [7]. Тип проекта определяет его свойства и характеристики, а также выбор методов принятия управленческих решений. В сфере обеспечения региональной безопасности преимущественно реализуются долгосрочные организационно сложные смешанные мегапроекты, а также модульные оперативные и стратегические программы управления региональным развитием.

Известны следующие методы и подходы для решения задач управления проектами:

1) календарно-сетевое планирование и управление. В основе данного подхода лежит математический аппарат теории графов, позволяющий решать сложные оптимизационные задачи, используя методы дискретной математики;

2) качественный подход к управлению проектами, близкий по своей методологии к менеджменту организаций и развиваемый, в основном, зарубежными учеными;

3) количественный подход, основывающийся на анализе и синтезе математических моделей механизмов управления проектами и процедурах принятия управленческих решений. Данный подход оперирует комбинациями методов теории игр, исследования операций, имитационного моделирования, математической экономики, теории активных систем, а также программно-целевого и ситуационного планирования.

Позиционируя проводимое исследование в рамках приведенных подходов, можно сказать, что разрабатываемая информационная технология поддержки управления проектами в сфере обеспечения региональной безопасности использует комбинацию двух направлений – количественного и календарно- сетевого планирования и управления. При этом выбор математической модели того или иного типа определяется характеристиками решаемой задачи управления и заданными условиями для каждой конкретной ситуации.

Для эффективного управления региональными социально-экономическими системами создаются разнообразные информационные технологии и средства, ориентированные на подготовку рекомендаций лицам, принимающим решения. Выработка рекомендаций обычно осуществляется за счет прогнозирования возможных вариантов развития ситуации и/или агрегирования разнородной информации, полученной из различных источников. Указанные действия выполняются на основе определенных формальных моделей, позволяющих представить состав и взаимосвязи между компонентами системы управления, а также описать протекающие в ней процессы. Такие формальные модели служат промежуточным звеном между ментальными представлениями экспертов и создаваемыми информационными технологиями управления и позволяют полностью или частично автоматизировать процесс разработки соответствующих программных систем поддержки принятия решений.

**Постановка и формализация задачи управления проектами
в сфере региональной безопасности**

Для исследования феномена региональная безопасность (РБ) применяется системный подход, заключающийся в рассмотрении объекта исследования (региона) как сложной динамической системы.

Формально понятие «региональная безопасность» определяется на языке теоретико-множественных отношений и представляется в виде множества составляющих ее компонент, каждый из которых характеризует определенный аспект функционирования региональной социально-экономической системы:

$$RS = \{C_i^{RS}\}, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где N – количество составляющих региональной безопасности, участвующих в рассмотрении и соответствующих сферам регионального развития (экономика, окружающая среда, социальная сфера, кадровая политика, инновационный потенциал и др.).

Региональная безопасность как система декомпозируется на следующие основные составляющие, общие не только для каждого отдельно взятого региона, но и учитывающие его специфические особенности

$$RS = \{Econ, Ecol, Soc, Inf, Tech, Mil, Enrg\}, \quad (2)$$

где *Econ* – экономическая безопасность; *Ecol* – экологическая безопасность; *Soc* – социальная безопасность; *Inf* – информационная безопасность; *Tech* – техносферная безопасность; *Mil* – военная безопасность; *Enrg* – энергетическая безопасность.

Так, для Мурманской области, региона входящего в состав Арктической зоны России, наиболее важными являются экологическая, военная и энергетическая сферы безопасности.

Каждый компонент региональной безопасности описывается набором определенных параметров

$$C_i^{RS} = \overline{P}_i, \overline{P}_i = \{p_{i,j}\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, K_i}, \quad (3)$$

где N – количество компонент региональной безопасности; K_i – количество параметров, описывающих i -й компонент региональной безопасности.

Все множество параметров, описывающих различные компоненты региональной безопасности, разделяется на две группы: внешние и внутренние. На параметры внешней среды система управления РБ оказывать прямого воздействия не может, а значит, должна к ним адаптироваться. Параметры внутренней среды региона – экономические, социальные, экологические, техногенные – являются управляемыми. Воздействуя на них, можно управлять региональной безопасностью.

В качестве меры для интегральной оценки региональной безопасности предлагается использовать матрицу региональной безопасности [12], которая формируется на основе системы индикаторов безопасности региона и включает в себя показатели для каждой сферы безопасности [13]:

$$M_{RS} = \{m_{i,j}\}, m_{i,j} = p_{i,j}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, K}, K = \max_i(K_i), \quad (4)$$

где M_{RS} – матрица РБ; p_{ij} – j -й показатель i -го компонента РБ; N – количество компонент РБ, K_i и K – количество показателей i -го компонента и наибольшее количество показателей в строке матрицы РБ соответственно.

Анализ матрицы РБ позволяет разработать формальные процедуры сравнения различных сценариев социально-экономического развития региона в заданных условиях.

Для каждого показателя региональной безопасности справедливо утверждение, что состояние РБ считается безопасным по данному показателю, если значение этого показателя находится в пределах допустимого интервала значений

$$\min_{ij} \leq m_{ij} \leq \max_{ij}. \quad (5)$$

Предельно допустимые нижние \min_{ij} и верхние \max_{ij} значения каждого параметра РБ определяются из регламентирующей документации, а при ее отсутствии – с помощью экспертных

оценок. Таким образом, в матричном виде условие безопасности региона определяется следующим образом:

$$M_{\min} \leq M_{RS} \leq M_{\max}. \quad (6)$$

Выражение (6) используется для определения состояний региональной безопасности, при которых возникают угрозы (риски), требующие оперативного принятия определенных мер, направленных на их устранение или смягчение негативных последствий от воздействия на элементы социально-экономической системы региона.

Стоит отдельно отметить, что для учета особенностей процессов обеспечения региональной безопасности необходимо выработать особую систему параметров, связанных со спецификой конкретной территории. Для этого требуется и специальная проработка системы показателей региональной безопасности, которая должна быть взаимосвязана с общей схемой анализа показателей, используемых на федеральном и отраслевом уровнях. Эта система должна также совмещаться с действующей системой статистики и прогнозирования, сопровождаться регулярным мониторингом и прогнозированием факторов, влияющих на уровень угроз региональной безопасности [14].

С другой стороны, динамику региональной безопасности следует рассматривать как изменение сложной системы и представить ее в виде последовательности устойчивых состояний:

$$\{S_k\}, S_k \in S, k = \overline{1, K_s}, \quad (7)$$

где S – множество устойчивых состояний системы; K_s – количество устойчивых состояний.

Для определения механизмов изменения состояния используется матрица переходов. Каждый элемент матрицы переходов отражает возможность перехода из одного устойчивого состояния системы в другое. На эту возможность влияет «цена перехода» c_{ij} , изменение оценки региональной безопасности $\Delta M_{RS(i,j)}$, а также время совершения изменения состояния системы T_{ij} . В данном случае под ценой перехода c_{ij} понимается оценка требуемых для изменения состояния ресурсов, выраженных в единых единицах измерения (например, в денежных условных единицах). Параметр $\Delta M_{RS(i,j)}$ отражает то, как именно изменится значение каждого показателя матрицы региональной безопасности при переходе из текущего состояния в новое. Параметр T_{ij} характеризует период времени, которое потребуется системе для перехода в новое состояние. Матрица переходов имеет вид

$$M(s_i, s_k) = \begin{pmatrix} 0 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1K_s} \\ \rho_{21} & 0 & \dots & \rho_{2K_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{K_s 1} & \rho_{K_s 2} & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

при этом $\rho_{ij} = f(c_{ij}, \Delta M_{RS}(i, j), T_{ij})$.

На элементы матрицы переходов накладываются следующие ограничения, вызванные вероятностным характером величины ρ_{ij} :

$$0 \leq \rho_{ij} \leq 1, \sum_{i=1}^{K_s} \rho_{ij} = 1, \sum_{j=1}^{K_s} \rho_{ij} = 1. \quad (9)$$

Любое мероприятие, связанное с изменением состояния региональной безопасности, предлагается рассматривать как соответствующий проект, применяя к нему методический аппарат теории управления проектами [7].

С точки зрения управления проектами отдельные предметно-ориентированные проекты объединяются в программы

$$\text{PROG} = \{PR_i\}, i = \overline{1, N_{PR}}, \quad (10)$$

где N_{PR} – количество проектов в программе.

В общепринятом представлении проект определяется как последовательность фаз (стадий), которые проходит проект в ходе своего жизненного цикла, а также совокупностью свойств, которые характеризуют его как относительно обособленный объект управления:

$$PR = \{LF, GPR, Type, RS, RK, TLF\}, \quad (11)$$

где LF – жизненный цикл проекта; GPR – цель и задачи проекта; $Type$ – тип проекта (инвестиционный, некоммерческий, оперативный, стратегический и др.); RS – ресурсы, необходимые для реализации проекта; RK – риски реализации проекта (для региональной безопасности – угрозы); TLF – продолжительность жизненного цикла проекта.

Принимая во внимание информацию о жизненном цикле проекта, представленную в работах [4, 5, 8], математически его можно представить в следующем виде:

$$LF = \langle Ph, Lk \rangle, \quad (12)$$

где Ph – множество фаз жизненного цикла; Lk – множество связей между фазами.

Такая формальная конструкция соответствует математическим моделям, которые применяются в теории и практике управления проектами [7–9], и позволяет представить жизненный цикл проекта в виде ориентированного взвешенного графа. В такой постановке задачи Ph определяет множество вершин орграфа, а Lk задает множество дуг и их характеристики (направление и веса).

Согласно международному стандарту ISO 21500:2014 [10] по управлению проектами выделяется пять основных фаз проекта: инициализация, планирование, исполнение, управление, завершение (рис. 1). В качестве весов дуг используется вероятность перехода из одной фазы проекта в другую. При этом вероятность перехода зависит от результатов выполнения фазы проекта. В свою очередь, на результат реализации определенной фазы проекта влияет текущее и/или прогнозируемое состояние региональной безопасности.

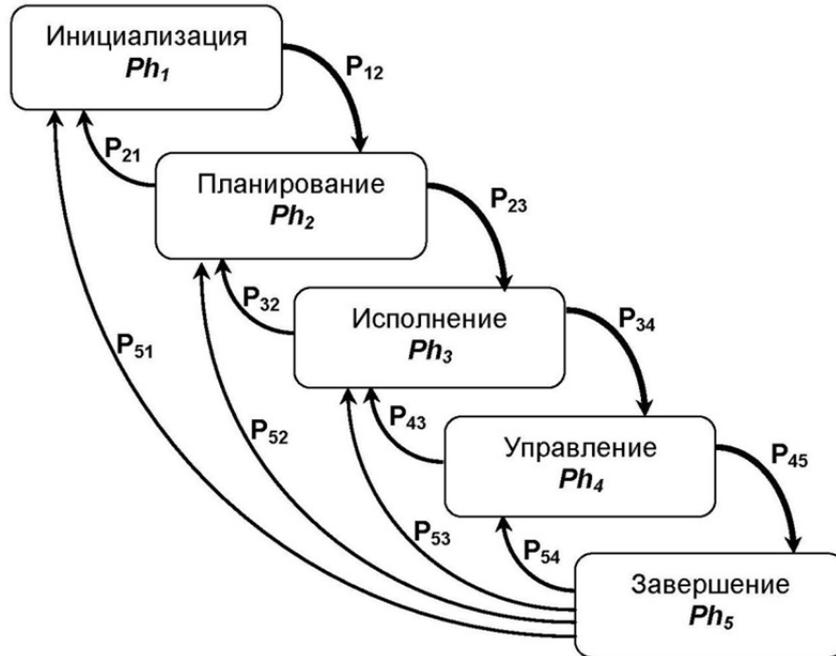


Рис. 1. Обобщенное представление жизненного цикла проекта

Следует отметить, что данная конструкция может усложняться за счет введения дополнительных весов для дуг орграфа. Так, например, можно к весам добавить параметры, характеризующие «стоимость» перехода или временные задержки между фазами. Для решения задач на графах, дуги которых имеют несколько весов, применяются методы потокового программирования [15].

Связь между двумя фазами проекта определяется следующим образом:

$$l_{ij} = \langle Ph_i, Ph_j, \bar{w}_{ij} \rangle, \quad \bar{w}_{ij} = func(Ph_i, M_{RS}), \quad (13)$$

где Ph_i – фаза проекта, из которой осуществляется переход; Ph_j – фаза проекта, в которую осуществляется переход; \bar{w}_{ij} – вектор весовых коэффициентов связи.

При этом вектор весовых коэффициентов связи \bar{w}_{ij} определяется как функциональная зависимость от результатов предыдущей фазы проекта и состояния региональной безопасности, оцененного с помощью матрицы РБ.

Сетевая модель представления жизненного цикла проекта позволяет формулировать и решать разнообразные задачи управления. Основной задачей управления является формирование последовательности выполнения фаз проекта в зависимости от различных параметров проекта и последующая коррекция хода выполнения проекта в зависимости от результатов реализации конкретной стадии.

Формальное описание фазы проекта представляется в виде кортежа

$$Ph_l = \langle Op^l, Gr^l, St^l, G^l, RS^l, T_0^l, T_g^l, TLF^l, Res^l \rangle, \quad (14)$$

где $Op^l = \{o_j^l\}, j = 1, \overline{N_{Op}^l}$ – множество операций, которые требуется выполнить на l -й фазе проекта; N_{Op}^l – количество операций на l -й фазе проекта; Gr^l – календарный график выполнения l -й фазы проекта; St^l – множество стейкхолдеров (заинтересованных лиц) на l -й фазе проекта; G^l – цели и задачи l -й фазы проекта; RS^l – множество ресурсов, требуемых для выполнения l -й фазы; T_0^l и T_g^l – начальное и конечное время выполнения l -й фазы проекта; TLF^l – продолжительность l -й фазы проекта; Res^l – результаты выполнения l -й фазы проекта.

Каждую операцию можно описать с точки зрения процессного подхода [16], выделив основной процесс, исходные материалы и информацию, исполнителей, регламенты и процедуры выполнения процесса, а также его результаты. Календарный график реализации фазы проекта предназначен для описания последовательности выполнения определенных операций и может быть представлен в виде сетевой структуры.

Традиционно в качестве стейкхолдеров рассматриваются следующие субъекты управления: инвестор, заказчик, генконтрактор, руководитель проекта, исполнитель проекта, поставщик, официальный регулятор. При этом разработаны математические модели [4, 7], описывающие поведение каждой из заинтересованных сторон в зависимости от их целевых установок и критериев оценки результатов.

Цели и задачи конкретной фазы выполнения проекта определяются в результате декомпозиции глобальной цели проекта. Для этого предлагается применять функционально-целевой подход [17] к исследованию сложных систем. В качестве ресурсов рассматриваются как материальные, так и нематериальные объекты, которые необходимы для успешной реализации фазы проекта. Задается внутренняя структура множества ресурсов, в которой выделяются отдельные подмножества потребностей и лимитов (ресурсных ограничений).

Согласно основным положениям проектного менеджмента на временные характеристики проекта и его фазы накладываются ограничения:

$$T_0^l \leq t + T_{LF}^l \leq T_g^l \quad \text{– на время реализации фазы проекта;}$$

$$T_{LF}^l \geq \sum_{l=1}^L T_{LF}^l \quad \text{– на соотношение продолжительности проекта и продолжительности его фаз.}$$

В рамках проводимого исследования результаты выполнения фазы проекта должны влиять на состояние региональной безопасности. Для этого предлагается при оценке результатов реализации фазы сразу формировать ее в виде изменения показателей региональной безопасности, т.е. каждой фазе проекта ставить в соответствие ΔM_{RS} .

В данном разделе рассмотрена концептуальная модель объекта исследования – региональной безопасности, регламентирующая основные структурные части и их внутреннюю взаимосвязь на определенном уровне детализации модели. Взаимодействие между компонентами модели разных уровней детализации представлено в общей схеме управления региональной безопасностью.

Концептуальная модель системы управления региональной безопасностью

В общем случае задача управления региональной безопасностью заключается в поиске такого допустимого вектора управления, которое имеет максимальную эффективность и определяет оптимальную траекторию движения объекта управления в пространстве устойчивых состояний. Опираясь на аппарат теории управления [18, 19], формально модель системы управления РБ можно представить в классической форме (рис. 2). Такая обобщенная математическая постановка адаптирована для задач управления системами различной природы, в том числе региональной безопасностью [12].

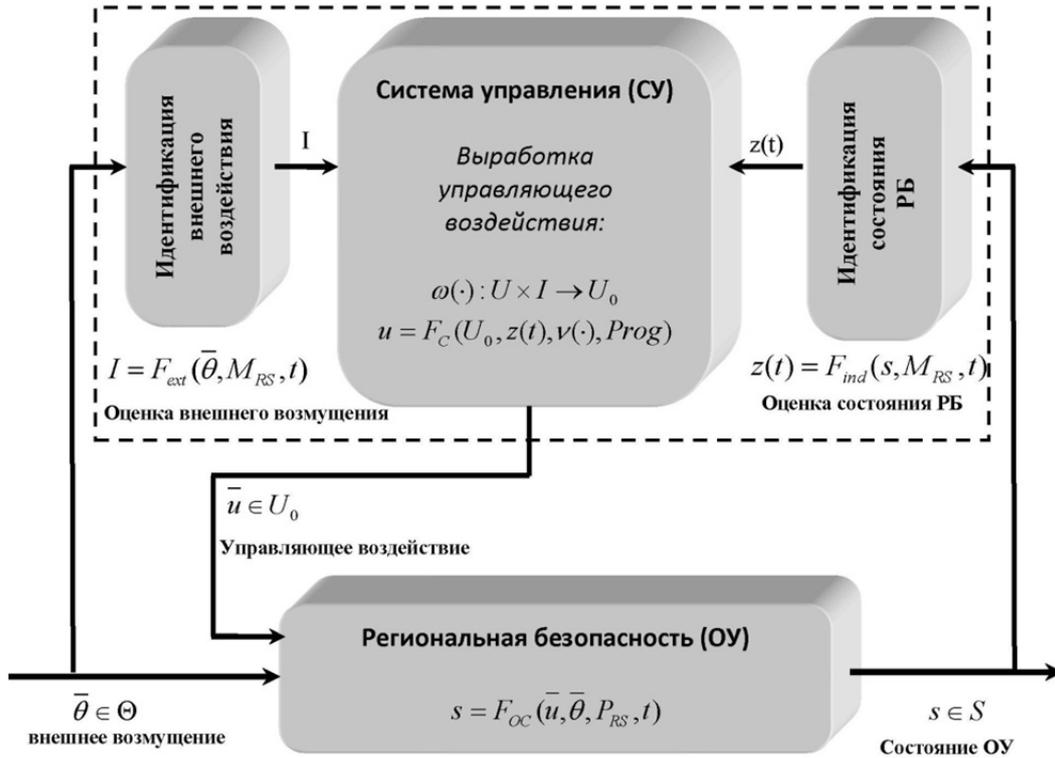


Рис. 2. Общая концептуальная схема управления региональной безопасностью

Для оценки эффективности управления предлагается использовать функционал вида

$$E(u) = \max_{u \in U} f(u, s), \quad f = f(u, F_{OC}(u, \theta, P_{RS}, t)), \quad (15)$$

где $u \in U$ – управляющее воздействие; $s \in S$ – состояние объекта управления.

Для определения текущего состояния объекта управления используется функция вида

$$s = F_{OC}(u, \theta, P_{RS}, t), \quad (16)$$

где θ – множество воздействий внешней среды; P_{RS} – множество параметров объекта управления; t – время.

Модель субъекта управления структурно подразделяется на три функциональные составляющие: блок идентификации внешнего воздействия, блок идентификации состояния объекта управления и блок выработки управляющего воздействия.

Идентификация влияния внешней среды на объект управления представляется в виде

$$I = F_{ext}(\bar{\theta}, M_{RS}, t), \quad (17)$$

где I – оценка внешнего воздействия субъектом управления; θ – непосредственно вектор внешнего воздействия; M_{RS} – матрица региональной безопасности; t – время.

Назначение блока идентификации внешнего воздействия состоит в формировании информации о влиянии внешней среды на показатели региональной безопасности.

Основной задачей блока идентификации состояния объекта управления является получение оценки текущего состояния региональной безопасности в терминах показателей соответствующей системы индикаторного оценивания. Формально функционирование данного блока можно представить в виде

$$z(t) = F_{ind}(s, M_{RS}, t), \quad (18)$$

где $z(t)$ – оценка текущего состояния региональной безопасности; s – состояние объекта управления; M_{RS} – матрица региональной безопасности; t – время.

Процесс выработки управляющего воздействия выполняется в два этапа:

1) формирование множества применимых в текущих условиях стратегий управления U_0 , которое определяется в результате использования оператора вида

$$\omega(\cdot): U \times I \rightarrow U_0. \quad (19)$$

Данный оператор осуществляет отображение декартового произведения множества всех возможных стратегий управления U и множества оценок внешнего воздействия I на множество допустимых в текущих условиях стратегий управления региональной безопасностью U_0 ;

2) формирование управляющего воздействия на объект управления. Для формального описания данного этапа используется выражение вида

$$u = F_c(U_0, z(t), v(\cdot), Prog), \quad (20)$$

где U_0 – множество допустимых в текущих условиях стратегий управления; $z(t)$ – оценка текущего состояния объекта управления; $v(\cdot)$ – функция полезности, задающая предпочтения субъекта управления; $Prog$ – программа проектов (реализуемых и/или планируемых к реализации).

Под системой управления РБ (см. рис. 2) понимается совокупность информационных технологий и средств, позволяющих неявно управлять ходом реализации мероприятий в сфере обеспечения РБ. При этом основными задачами являются:

- оценка текущего состояния РБ;
- проведение анализа плана реализации или результатов выполнения проекта (мероприятия) в сфере РБ с целью выявления потенциальных угроз;
- выработка соответствующих рекомендаций ЛПР по реализации проекта или внесение корректировок в жизненный цикл проекта;
- оценка последствий при реализации предлагаемого управляющего воздействия на состояние РБ за счет манипуляции планируемыми и реализуемыми проектами.

Теоретико-множественная модель (8)–(11), (15)–(20) обеспечивает формальную основу для автоматизации синтеза программной исполнительской среды управления региональной безопасностью и выбора адекватных средств информационной поддержки задач управления и принятия решений для успешной реализации каждой фазы жизненного цикла проекта. В модель могут быть встроены теоретические конструкции [20], что позволит также решать задачи координации в системах управления региональной безопасностью.

При реализации предлагаемой модели необходимо учитывать, что появление новых проектов, как правило, зависит от состояния региональной безопасности, а цели проектов должны быть ориентированы на нейтрализацию потенциальных угроз и опасностей, а также на смягчение последствий возможных кризисных ситуаций в регионе.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложены новые формулировки терминов в сфере региональной безопасности, не противоречащие официально принятым и уточняющие содержание этой перспективной предметной области с помощью конкретных формализмов, что расширяет понятийный аппарат теории безопасности сложных систем и делает его более конструктивным.

2. Впервые предложен подход к формализации задачи управления региональной безопасностью, основанный на комбинированном применении технологии концептуального моделирования, формального аппарата теории управления и проектного менеджмента.

3. Разработана новая теоретико-множественная модель жизненного цикла управления проектами, адаптированная и расширенная на задачи обеспечения безопасности социально-экономических систем регионального уровня, а также отличающаяся полнотой формального описания объектов и задач управления безопасностью и связанных с ними информационных процессов. Модель имеет многоуровневую структуру и обеспечивает возможность построения онтологических и имитационных моделей региональной безопасности, которые могут быть использованы в составе систем поддержки принятия решений в сфере регионального управления.

Результаты использованы при реализации «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.» на территории Мурманской области в части создания средств информационно-аналитической поддержки [20, 21] для задач управления и принятия решений в сфере обеспечения региональной безопасности. Эти средства позволяют лицу, принимающему решения, получать в автоматизированном режиме агрегированную аналитическую информацию о возможных последствиях реализации того или иного регионального проекта еще на стадии планирования, а также оценивать и принимать решения в фазе оперативного управления проектом.

Библиографический список

1. Загребнев, С. А. Региональная безопасность в системе национальной безопасности Российской Федерации / С. А. Загребнев // Власть. – 2010. – № 10. – С. 90–92.
2. Ильин, В. А. Национальная и региональная безопасность: взгляд из региона / В. А. Ильин // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2013. – № 3 (27). – С. 9–20.
3. Маслобоев, А. В. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
4. Воропаев, В. И. Математические модели проектного управления для заинтересованных сторон / В. И. Воропаев, Я. Д. Гельруд // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : ИПУ РАН, 2014. – С. 8278–8289.
5. Воропаев, В. И. Математические модели управления для руководителя и команды управления проектом (часть 1) / В. И. Воропаев, Я. Д. Гельруд // Управление проектами и программами. – 2014. – Вып. 1 (37). – С. 62–71.
6. Катаев, А. В. Управление проектами: математические модели оптимального назначения исполнителей проектных работ / А. В. Катаев, Т. М. Катаева, Е. Л. Макарова // Известия Саратовского университета. Сер.: Экономика. Управление. Право. – 2016. – Т. 16, вып. 3. – С. 294–299.
7. Новиков, Д. А. Управление проектами: организационные механизмы / Д. А. Новиков. – М. : ПМСОФТ, 2007. – 140 с.
8. Логиновский, О. В. Информационно-аналитическая система управления проектами на базе использования комплекса математических моделей функционирования стейкхолдеров / О. В. Логиновский, Я. Д. Гельруд // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 133–141.
9. Привалов, А. И. Математические модели управления проектами в решении системных проблем экономики / А. И. Привалов // Сегодня и завтра российской экономики. – 2009. – № 26. – С. 43–48.
10. ГОСТ Р ИСО 21500:2014 Руководство по проектному менеджменту. – М. : Стандартинформ, 2015. – 46 с.
11. Международный Стандарт по Управлению Проектами ISO 21500:2012. – URL: <http://mconlab.com/stati/proekty/27-iso-21500-russkaya-versiya>.
12. Маслобоев, А. В. Развитие методологии сетецентрического управления региональной безопасностью. Часть 1. Системный анализ проблемы / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Труды Института системного анализа РАН. – 2016. – Т. 66, № 1. – С. 26–39.
13. Bystrov, V. V. The Information Technology of Multi-model Forecasting of the Regional Comprehensive Security / V. V. Bystrov, S. N. Malygina, D. N. Khaliullina // Proceedings of the 5th Computer Science On-line Conference Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 3. – P. 475–482.
14. Управление региональной безопасностью на основе сценарного подхода / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов. – М. : ИПУ РАН, 2014. – 163 с.
15. Кутепов, В. П. Граф-схемное потоковое параллельное программирование: язык, процессная модель, реализация на компьютерных системах / В. П. Кутепов, В. Н. Маланин, Н. А. Панков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 1. – С. 67–82.
16. Наумов, А. А. Управление экономическими системами: процессный подход / А. А. Наумов, М. А. Максимов. – Новосибирск : ОФСЕТ, 2008. – 300 с.

17. Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов, Ю. С. Попков, А. Г. Олейник, В. А. Путилов. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
18. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Физматлит, 2012. – 604 с.
19. Цыгичко, В. Н. Руководителю о принятии решений / В. Н. Цыгичко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Красанд, 2010. – 352 с.
20. Маслобоев, А. В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов, А. В. Сютин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 130–138.
21. Маслобоев, А. В. Система поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций / А. В. Маслобоев // Информационные ресурсы России. – 2017. – № 4 (158). – С. 25–32.

Быстров Виталий Викторович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: vitbyst@mail.ru

Маслобоев Андрей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты
ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Путилов Владимир Александрович

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
научный руководитель организации,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты
ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: putilov@iimm.ru

Bystrov Vitaliy Viktorovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Institute of informatics and mathematical modelling
of technological processes
of Kola Science Centre RAS,
(184209, 24A Fersmana Street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

Masloboev Andrey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Institute of informatics and mathematical modelling
of technological processes
of Kola Science Centre RAS,
(184209, 24A Fersmana Street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

Putilov Vladimir Aleksandrovich

honoured science worker of RF,
doctor of technical sciences, professor,
scientific supervisor of organization,
Institute of informatics and mathematical modelling
of technological processes
of Kola Science Centre RAS,
(184209, 24A Fersmana Street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

Аннотация. Для построения и поддержки функционирования информационно-управляющих систем обеспечения региональной безопасности разработана концептуальная модель жизненного цикла управления проектами в сфере рискоустойчивого регионального развития. Модель основана на принципах классической теории управления и проектного менеджмента. В модели используются формальное описание предметной области, аппарат теории управления проектами и формализованная схема управления безопасностью региона. Модель имеет многоуровневую структуру и отражает специфику задач управления мероприятиями, оказывающими воздействие на состояние региональной безопасности. Предлагается каждое мероприятие рассматривать как отдельную совокупность проектов, что поз-

Abstract. For knowledge-based information-management system engineering and functioning assurance of regional security support a project management life-cycle conceptual model in the field of risk-sustainable regional development has been designed. The model is based on classical control theory and project management principles. The model uses knowledge domain formal description, project management theory apparatus and regional security control formalized scheme. The conceptual model has a multilevel structure and reflects the management problem-solving peculiarity of emergency executive measures that impact on regional security condition. Each event is proposed to consider as a separate set of projects, that allows transferring regional security research to the plane of project management problem-solving. The model implementa-

воляет перевести исследование региональной безопасности в плоскость решения задач управления проектами. Реализация модели позволяет осуществить автоматизированный синтез онтологических и имитационных моделей и их последующее использование в составе систем поддержки принятия решений в сфере обеспечения региональной безопасности. Сценарный анализ и прогнозирование вариантов развития региональных кризисных ситуаций на основе модели повышают информационную обеспеченность системы управления безопасностью региона и качество принимаемых управленческих решений.

Ключевые слова: концептуальная модель, жизненный цикл, управление проектами, региональная безопасность, информационная поддержка принятия решений.

УДК 004.94, 338.24

Быстров, В. В.

Применение проектного менеджмента в задачах управления региональной безопасностью: подход и формальный аппарат / В. В. Быстров, А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 73–84. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-10.

tion allows ontological and simulation models automated synthesis realization and its further application within the decision support system in the field of region safeguarding. Scenario-based analysis and prediction of regional crisis situation expansion alternatives on the basis of designed model provide efficiency enhancement of regional security control system information support and quality of managerial decision-making.

Key words: conceptual model, life-cycle, project management, regional security, decision-making information support.

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ КРУГЛОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИРОДНОГО И СЖИЖЕННОГО ГАЗОВ В ДИФФУЗИОННОМ ФАКЕЛЕ

Р. А. Штыков

Введение

Природный газ имеет в своем составе ряд компонентов: метан, этан, пропан, азот и др. В составе добываемого из различных месторождений в разное время природного газа эти компоненты имеют различные концентрации. С изменением состава горючего характеристики его меняются, что и влияет на процессы тепло- и массообмена при истечении горючего из круглого сопла с радиусом a и распространении его в затопленном воздухом пространстве при наличии диффузионного фронта пламени.

Постановка задачи

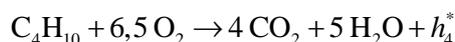
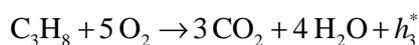
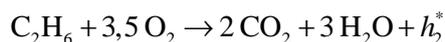
При умеренных скоростях процесс описывается уравнениями теории турбулентного пограничного слоя многокомпонентного газа с соответствующими граничными условиями с той разницей, что способ приведения N уравнений сохранения количества i -го компонента к одному уравнению еще не известен, а для температуры имеем

$$\bar{T} = \frac{\bar{C}_{pl}}{\bar{C}_p} \left(H(\bar{H}_2 - 1) + 1 - \sum_{i=1}^5 C_i h_i^* \right).$$

Горючее в своем составе имеет горючие компоненты метана, этана, пропана, бутана и пентана; кроме этих компонентов, в движении участвуют молекулы кислорода, углекислого газа, водяного пара и азота.

Построение модели

Реакции горения протекают согласно формулам



которые можно написать в общем виде при $k = 1, 2, 3, 4, 5$:



Начальная концентрация кислорода $\langle C_{\text{O}} \rangle_1$ распределяется между горючими A_k так, что $\langle C_{\text{O}_i} \rangle_1$ часть кислорода (весовая концентрация по всей массе) вступает в реакцию только с i -м компонентом горючего. Тогда

$$\langle C_{\text{O}} \rangle_1 = \sum_{i=1}^5 \langle C_{\text{O}_i} \rangle_1. \quad (1)$$

Для каждого горючего компонента вводится консервативная функция \bar{C}_i , местоположение фронта пламени i -го горючего определяется из условия

$$\bar{C}_i = \bar{C}_i^*,$$

где $\bar{C}_i^* = \frac{v_i m_i < C_{O_i} >_1}{v_i m_i < C_{O_i} >_1 + v_{O_i} m_{O_0} < C_i >_2}$ при $i = 1, 2, 3, 4$ и 5 .

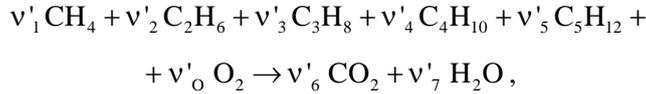
На основе гипотезы наличия единого фронта пламени имеем

$$\begin{aligned} \frac{v_{O_1} m_{O_0} < C_1 >_2}{v_1 m_1 < C_{O_1} >_1} &= \frac{v_{O_2} m_{O_0} < C_2 >_2}{v_2 m_2 < C_{O_2} >_1} = \frac{v_{O_3} m_{O_0} < C_3 >_2}{v_3 m_3 < C_{O_3} >_1} = \\ &= \frac{v_{O_4} m_{O_0} < C_4 >_2}{v_4 m_4 < C_{O_4} >_1} = \frac{v_{O_5} m_{O_0} < C_5 >_2}{v_5 m_5 < C_{O_5} >_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решив совместно уравнения (1) и (2), получим

$$\bar{C}_i^* = \frac{v_{O_i} < C_{O_0} >_1 < C_i >_2}{v_i m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k} < C_k >_2}{v_k m_k}}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

и составим единое стехиометрическое уравнение



где

$$\begin{aligned} v'_0 = 1, \quad v'_1 = \frac{< C_{O_1} >_1}{2,0 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_2 = \frac{< C_{O_2} >_1}{3,5 < C_{O_0} >_1}, \\ v'_3 = \frac{< C_{O_3} >_1}{5,0 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_4 = \frac{< C_{O_4} >_1}{6,5 < C_{O_0} >_1}, \quad v'_5 = \frac{< C_{O_5} >_1}{8,0 < C_{O_0} >_1}, \\ v'_6 = v'_1 + 2v'_2 + 3v'_3 + 4v'_4 + 5v'_5, \quad v'_7 = 2v'_1 + 3v'_2 + 4v'_3 + 5v'_4 + 6v'_5. \end{aligned}$$

Для рассматриваемых реагентов имеют место соотношения

$$\omega_7 v'_i m_i \pm \omega_i v'_7 m_7 = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6,$$

где массовые скорости ω_i при $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ принимают не положительные значения, а при $i = 6, 7$ – не отрицательные.

Вместо C_i вводятся функции \tilde{C}_i и \bar{C}_i в виде

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} C'_7 v'_i m_i + C_i v'_7 m_7, & i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \\ C'_7 v'_i m_i - C_i v'_7 m_7, & i = 6; \end{cases} \quad (3)$$

и уравнения принимают единый и взаимно эквивалентный вид.

Сопоставив (2) и (3), получим семь линейных уравнений относительно восьми неизвестных значений концентраций C_i . Из этих уравнений определим значение концентраций компонентов:

при $1 > \tilde{C}_i > \bar{C}_i^*$ отсутствует кислород, т.е. $C_{O_0} = 0$. Тогда решая систему из семи линейных уравнений, найдем

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} \left(< C_i >_2 + < C_{O_i} >_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_{O_0}} \right) \bar{C} - < C_{O_i} >_1 \frac{v_i m_i}{v_{O_i} m_{O_0}}, & i = 1 \dots 5 \\ \left(< C_i >_1 + \frac{m_i}{m} \sum_{k=1}^5 \frac{v_{O_k}}{v_{O_k}} < C_{O_k} >_1 \right) (1 - \bar{C}) - < C_i >_2 \bar{C}, & i = 6 - 7. \end{cases}$$

При $\bar{C}^* > \bar{C} \geq 0$ отсутствуют горючие компоненты, т.е. $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 0$ и

$$\tilde{C}_i = \begin{cases} < C_{O_2} >_1 - \left(< C_{O_2} >_1 + m_O \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok}}{v_k m_k} < C_k >_2 \right) \bar{C}, & i=0 \\ < C_i >_1 + \left(< C_i >_2 - < C_i >_1 m_i \sum_{k=1}^5 \frac{v_{ik}}{v_{Ok} m_k} < C_k >_2 \right) \bar{C}, & i=6-7, \end{cases}$$

где

$$\bar{C}^* = \left(1 + \sum_{k=1}^5 \frac{v_{Ok} m_O < C_k >_2}{v_k m_k < C_{O_2} >_1} \right)^{-1}.$$

На основе второй части уравнения определим концентрацию молекулярного азота

$$C_8 = < C_8 >_1 + (< C_8 >_2 - < C_8 >_1) \bar{C}.$$

После введения консервативной функции \bar{C} и определения концентраций вернемся к основным уравнениям, которые решаются при

$$\begin{aligned} T_1 &= 300 \text{ K}, & T_2 &= 500 \text{ K}, & < C_{O_2} >_1 &= 0,232 \text{ кг/кг}, \\ < C_8 >_1 &= 0,768 \text{ кг/кг}, & h_1^* &= 11985 \text{ ккал/кг}, & h_2^* &= 11375 \text{ ккал/кг}, \\ h_3^* &= 11102 \text{ ккал/кг}, & h_4^* &= 10950 \text{ ккал/кг}, & h_5^* &= 11091 \text{ ккал/кг}, \\ h_0^* &= h_6^* = h_7^* = h_8^* &= 0 \text{ ккал/кг}. \end{aligned}$$

Составы горючего принимали согласно данным табл. 1.

Таблица 1

Массовые составы горючих газов $< C_i >_2$,
использованные для расчета круглого турбулентного факела

i	Компоненты	Составы					
		1	2	3	4	5	6
1	Метан	0,946	0,857	1	0,95	0,014	0
2	Этан	0,023	0,35	0	0,05	0,07	0,016
3	Пропан	0,005	0,04	0	0	0,427	0,964
4	Бутан	0,003	0,03	0	0	0,484	0,02
5	Пентан	0	0,004	0	0	0	0
6	Углекислый газ	0,001	0,021	0	0	0,005	0
7	Водяной пар	0	0	0	0	0	0
8	Молекулярный азот	0,22	0,013	0	0	0	0

Следует отметить, что пятый состав представляет собой сжиженный газ для теплого климата (в его составе преобладает более тяжелый компонент бутан), а шестой – для холодного климата.

Произведенные расчеты показывают, что для горючих составов 1–4 процессы тепло- и массообмена протекают почти одинаково: максимальная разница безразмерной скорости в соответствующих координатах составляет 0,005.

Кривые выгорания, определяемые с помощью формулы

$$I(x) = \int_0^{y+\infty} \left(\sum_{k=1}^5 C_k h_k^* \right) \rho u y dy,$$

имеют также качественно и количественно близкие формы. Длины фронта пламени этих горючих меняются в пределах 19,70...20,23 (разница составляет не более 3%), а формы фронтов близкие (рис. 1), несмотря на то, что безразмерные плотности горючих меняются в пределах 0,3329...0,3609, а теплотворные способности – 11486...11985 ккал/кг. Температура на фронте пламени составила 2500...2510 К.

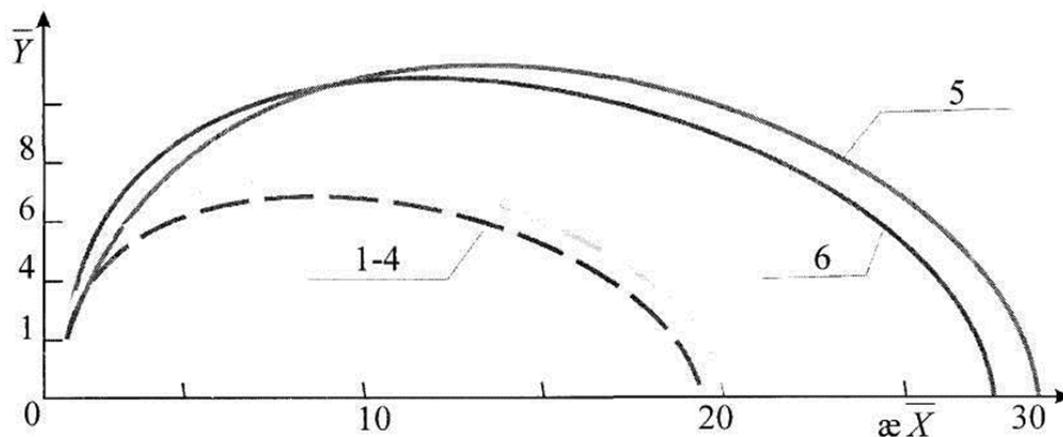


Рис. 1. Формы фронтов пламени в осесимметричной струе при горении природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе

Выводы

Наибольшее отличие наблюдается при сжигании горючих газов с составами 5 и 6 по сравнению с горючими 1–4. Благодаря большей плотности, чем составы 1–4, их осевые значения скорости убывают медленнее, а граница пограничного слоя сужается. Этот факт обусловлен не только начальными значениями плотности, но и величиной теплоты сгорания рассматриваемых горючих составов. Поэтому процесс смешения происходит медленнее, что в конечном итоге приводит к удлинению фронта пламени (рис. 2).

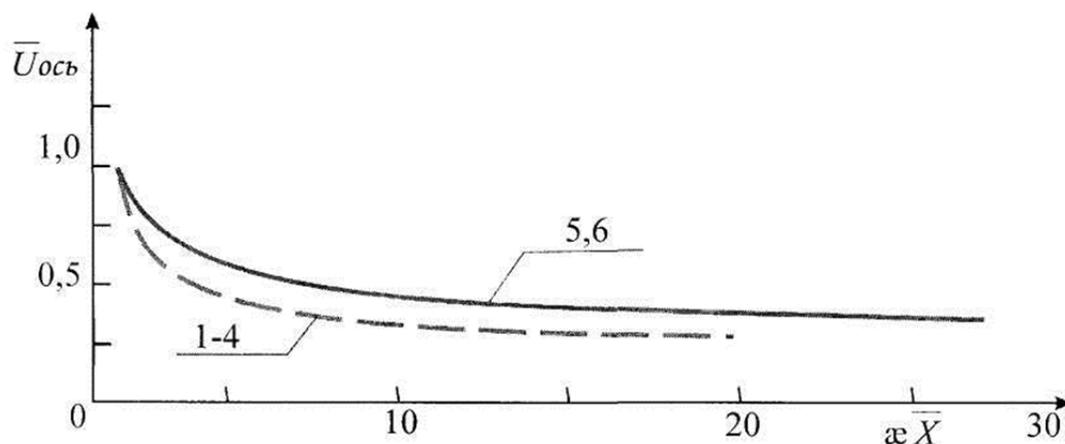


Рис. 2. Осевые значения скорости осесимметричной струи природного газа различных месторождений (1–4) и сжиженного газа (5–6) в воздухе при наличии диффузионного факела

Полученные результаты проверены с помощью интегралов сохранения импульса и полной энтальпии. Интегралы сохраняли свои значения с точностью до 5,0 %.

Частным случаем рассмотренной задачи и методики расчета является процесс горения пропанобутановой смеси, рассмотренной в [1, 2].

При решении задач диффузионного горения газа в воздухе вместо природного газа можно принимать горючую смесь, состоящую из метана (состав 3 табл. 1) или из смеси метана с азотом

(состав 4 табл. 1), т.е. только с одним горючим компонентом, что намного упрощает решение задачи. В связи с этим приведенные результаты расчетов следует отнести к диффузионному горению смеси природного и доменного газов в воздухе.

Список литературы

1. Юрков, Н. К. Расчет турбулентного факела, образованного при сжигании попутных газов некоторых объектов азотной промышленности / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 4. – С. 66–69.
2. Юрков, Н. К. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков, // Труды международного симпозиума Надежность и качество сложных систем. – 2016. – Т. 1. – С. 163–165.

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной математики,
Муромский институт Владимирского
государственного университета
(602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 25)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Shtjkov Roman Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(602264, 25 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Аннотация. Сформулирована и решена задача процесса диффузионного горения горючей смеси с пятью горючими компонентами. Показано, что факелы сжиженных газов в осесимметричной струе в 1,5 раза длиннее факелов природного газа, а длина диффузионных факелов природных газов и чистого метана отличаются не более чем на 3%. Суммирование концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя, стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени, показывает адекватность расчета процесса образования круглой турбулентной струи.

Ключевые слова: турбулентная струя, газ, параметры, факел, горение.

Abstract. The problem of diffusion combustion of a combustible mixture with five combustible components is formulated and solved. It is shown that the flares of liquefied gases in an axisymmetric jet are 1.5 times longer than natural gas flares, and the length of diffusion flares of natural gases and pure methane differ by not more than 3%. The summation of the concentrations of the components in the fuel and oxidizer zones, the stoichiometric intake of combustible gases and oxygen (air) to the flame front, show the adequacy of calculating the formation of a circular turbulent jet.

Key words: turbulent jet, gas, parameters, torch, combustion.

УДК 681.324

Штыков Р. А.

Процесс образования круглой турбулентной струи природного и сжиженного газов в диффузионном факеле / Р. А. Штыков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 85–89. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-11.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 621.37/629.78

DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-12

УЧЕТ СЛУЧАЙНОСТИ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОБОРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

Н. А. Северцев, А. А. Зацаринный

Введение

Для расчета на прочность при переменных нагрузках в случае сложного напряженного состояния можно использовать соответствующие теории прочности. В подавляющем большинстве случаев расчеты на прочность деталей, работающих при переменных напряжениях, выполняют как проверочные. При этом расчет производят в форме проверки расчетного (действительного) коэффициента запаса прочности для каждого из предположительно опасных сечений детали и сравнении его с допускаемым значением для данной конструкции.

Результаты статических испытаний и испытаний на удар дают возможность только до некоторой степени судить о способности материала переносить длительно действующую переменную нагрузку. Для определения этой важной характеристики материала, нужной для расчета на прочность машин и сооружений, работающих при переменных напряжениях, производят особое испытание материала, называемое испытанием на выносливость или на усталость.

Пусть на характеристику X_i сложной динамической системы (СДС) задан допуск в следующих границах $a_i \leq \bar{x}_i \leq b_i$, где \bar{x}_i – случайная величина. Обозначим $p_i = P(a_i \leq \bar{x}_i \leq b_i)$. Тогда вероятность нахождения характеристики X_i , находящейся в допуске $[a_i, b_i]$, определится как $p_i = 1 - q_i$, где $q_i = P(X_i \notin [a_i, b_i])$ – вероятность того, что требования в технической документации не выполняются. Событие $X_i \notin [a_i, b_i]$ будем в дальнейшем называть неисправностью СДС по i -й характеристике. В определенных случаях это событие может привести к выходу из строя исследуемой СДС, и это будет ее отказ. Во многих случаях оказывается, что при выходе данной характеристики X_i , например, реактивного двигателя, за допуск, т.е. $X_i \notin [a_i, b_i]$, задача СДС может быть не выполнена или будет затруднено ее выполнение. Вероятность безотказной работы СДС по характеристике X_i определяется как $p_i = 1 - q_i \eta_i$, где η_i определяется соотношением

$$\eta_i = p(A/A_i). \quad (1)$$

Данное соотношение (1) представляет собой условную вероятность A , которое состоит в не выполнении СДС предназначенных функций на заданном интервале времени $[0, T]$ при условии, что имела место неисправность i -го элемента СДС. Вероятность события A вычисляется при условии, что $X_i \notin [a_i, b_i]$, т.е. при выходе X_i за установленный допуск $[a_i, b_i]$. Число η_i изменяется в пределах $0 \leq \eta_i \leq 1$ и называется коэффициентом неисправности $X_i \notin [a_i, b_i]$.

Рассмотрим частные случаи.

1. Характеристика X_i СДС такая, что при выходе X_i за установленный допуск ($X_i \notin [a_i, b_i]$) СДС не выполняет предназначенные задачи. Тогда вероятность $\eta_i = p(A/A_i) = 1$, а значит, $p_i = 1 - q_i \eta_i = 1 - q_i$, т.е. $p_i = P(a_i \leq X_i \leq b_i)$.

2. Характеристика X_i СДС такая, что при выходе X_i за установленный допуск (т.е. при $X_i \notin [a_i, b_i]$) СДС выполняет возложенные на нее функции. В такой ситуации вероятность $\eta_i = p(A/A_i) = 0$, а значит, $p_i = q_i \eta_i = 1$. Рассмотренные случаи являются крайними. Обобщенное же направление, при котором $p_i = q_i \eta_i$, является средним в том смысле, что $1 - q_i \leq p_i = 1 - q_i \eta_i \leq 1$. Будем полагать, что значение вероятности q_i найдено, характеризующее невыполнение требования по допуску на величину X_i , равное $q_i = 0,4$. Тогда если не учитывать коэффициенты η_i значимости неисправности СДС $X_i \in [a, b]$, то вероятность выполнения требований с учетом допуска $p_i = 1 - q_i = 1 - 0,4 = 0,6$. Пусть теперь по результатам моделирования процесса функционирования СДС найдено значение коэффициента η_i , которое оказалось равным $\eta_i = 0,2$. Тогда $p_i = 1 - q_i \eta_i = 1 - 0,4 \cdot 0,2 = 1 - 0,08 = 0,92$. По данному примеру следует вывод.

При расчете вероятности успешной работы СДС необходимо учитывать значения весовых коэффициентов η_i (коэффициентов значимости неисправностей) [1]. В случае их неучета будет занижено фактическое значение вероятности p_i , что приведет к ошибкам в расчетах, которые только при нахождении одной из вероятностей $p_i = P(X_i \notin [a_i, b_i])$ могут составлять величину равную $\varepsilon = 100 \% (q_i - q_i \eta_i) / q_i$ или $\varepsilon = 100 \% (1 - \eta_i)$. В частности, в условиях рассмотренного примера, ошибка от неучета указанного коэффициента составила бы величину $\varepsilon = 100 \% (1 - \eta_i) = (1 - 0,2) 100 \% = 20 \%$. Предположим, что для каждой из характеристик изучаемой СДС определено значение вероятности p_i выполнения требований $X_i \in [a, b]$, определенной в техническом задании по допуску с учетом коэффициентов η_i значимости неисправности $X_i \notin [a, b]$. Тогда вероятностный показатель безаварийной работы СДС может быть найден по формуле

$$P_{\text{ба}} = p_0 (1 - q_1 \eta_1) (1 - q_2 \eta_2) \dots (1 - q_N \eta_N) \quad (2)$$

или $R = p_0 \prod_{i=1}^N p_i$, где $p_i = 1 - q_i \eta_i$. При этом p_0 – вероятность выполнения задачи системой в целом, на заданном интервале времени $[0, T]$, определяется при условии, что все характеристики СДС находятся в установленных допусках. Значение p_0 , т.е. вероятность выполнения предназначенной задачи в целом на заданном интервале времени $[0, T]$ определяется при условии, что все характеристики системы находятся в установленных допусках. Значение p_0 определяется по результатам моделирования процесса функционирования СДС на интервале времени $[0, T]$.

Рассмотрим некоторые из возможных путей учета в моделях расчета работоспособности системы (надежности, безопасности и эффективности) при стохастическом характере физических переменных: нагрузки \hat{u} , сопротивляемости \hat{x} , являющихся характеристиками предельного состояния объекта, иначе системы, которую мы исследуем. К этой сложной технической динамической системе относятся транспортный водный корабль, летательные аппараты различных типов и другое, а также комплектующие их элементы, агрегаты, устройства и пр. [2].

Под предельным состоянием исследуемой системы понимается такое ее состояние, при котором она не может воспринимать действующую на нее нагрузку, т.е. происходит отказ. В общем случае на исследуемую систему действует множество различных по физической природе нагрузок, которых мы представляем m -мерным случайным вектором $\bar{U}_{\langle m \rangle} = \langle \bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_j, \dots, \bar{u}_m \rangle$.

Любая нагрузка, действующая на объект, воспринимается благодаря свойству объекта, «сопротивляемостью» (т.е. прочностью) этим нагрузкам. Эти свойства придаются системе и ее комплектующим в процессе ее создания и отработки, а число таких свойств соответствует числу нагрузок, действующих на систему при эксплуатации ее в соответствующих физических средах. Поэтому сопротивляемость (прочность) системы также может быть выражена m -мерным случайным вектором $\bar{X}_{\langle m \rangle} = \langle \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_m \rangle$, т.е. вектором сопротивляемости [2].

Для упрощения исследования обозначим главные компоненты вектора нагрузки и вектора сопротивляемости в виде $\bar{X}_{\langle m \rangle}$ и $\bar{U}_{\langle m \rangle}$. Здесь «главные» компоненты \bar{x} и \bar{u} векторов $\bar{X}_{\langle m \rangle}$ и $\bar{U}_{\langle m \rangle}$, соответственно, \bar{x} и \bar{u} , на остальные составляющие векторов $\bar{X}_{\langle m \rangle}$ и $\bar{U}_{\langle m \rangle}$ наложены ограничения $x_j < y_j$ [$j = 2(1)m$], которые заведомо выполняются. При такой постановке задачи рассматри-

вается возможность достижения предельного состояния только по одному типу нагрузки, действующей на объект, т.е. возможность наступления отказа определенной физической природы. Такой подход называют методом главной компоненты [1], подразумевая под этим выделение определяющих предельное состояние объекта характеристик и считая, что требования по другим « $m-1$ », составляющим качества объекта, удовлетворены, т.е. они находятся в заданных пределах, не вызывающих опасности отказа. Условие (критерий) безопасной работы исследуемого (механического) объекта или условие «недостижения» объектом предельного состояния в этом случае интерпретируется как условие «непревышения» действующей нагрузкой предельной величины свойства объекта сопротивляемости этой нагрузке, т.е. условие непревышения сопротивляемости. Условие «непревышения» записывается в следующем виде: $\bar{z} = (\bar{x} - \bar{u}) > 0$ (3). Это условие является критерием работоспособности и надежности исследуемой СДС (объекта). Тогда весь интервал возможных значений величины z можно разделить на две области: $z \geq 0$ – область безотказных состояний системы (объекта), $z < 0$ – область отказов. Для транспортных судов область отказов следует ранжировать и выявить такие отказы, которые могут привести к опасностям и аварийным ситуациям [3].

Показателями безопасной надежной работы системы (объекта), соответствующими критерию (3), будут:

– вероятность безотказной работы исследуемой системы (объекта):

$$P(\bar{u} \leq x) = P(z \geq 0) = \int_0^{\infty} \phi_{\bar{z}}(z) dz ; \quad (4)$$

– вероятность отказа:

$$P(\bar{u} > \bar{x}) = P(\bar{z} < 0) = \int_{-\infty}^0 \phi_{\bar{z}}(z) dz . \quad (5)$$

Когда надежность и безопасность высоки, то интегрирование «хвоста» функции плотности распределения $\phi_{\bar{z}}(z)$ по формуле (5) в вычислении затруднительно. В этом случае можно использовать (4) управляющей вычисления интеграла [4].

Расчитанное значение вероятности «непревышения» сравнивается с нормативным значением показателя надежности $P(\bar{z} \geq 0) \geq (P_n)$ (6), где n – нормативное (заданное) значение показателя надежности системы (объекта).

Рассмотренный методологический подход основан на переходе от описания случайного события $\bar{A}(\bar{x} - \bar{u})$, выраженного в форме двуместного дважды неопределенного предиката, к одноместному предикату $\bar{A}(\bar{z} < 0)$ или $\bar{A}(\bar{z} \geq 0)$.

Такой подход характерен для моделей расчета надежности, не учитывающих зависимости показателя надежности от времени [1].

Модель расчета надежности по критерию отказа, аргументом которого является величина отношения сопротивляемости к нагрузке

$$\bar{k} = \bar{x} / \bar{u} , \quad (7)$$

где \bar{k} – коэффициент запаса, который является случайной величиной (СВ), в отличие от коэффициента прочности $R = \bar{x} / \bar{u}$, представляющей собой отношение средних величин [5].

Если плотность распределения \bar{k} известна – это достаточно сложная задача с нелинейным преобразованием распределений случайных величин, стоящих в числителе и знаменателе отношения (7), то вероятность наступления предельного состояния можно определить как [6]

$$P(\bar{k} < 1) = \int_0^1 \phi_{\bar{k}} dk . \quad (8)$$

Сопротивляемость исследуемой системы (объекта) должна отражать его способность сопротивляться действующим нагрузкам как единого целого. Это означает, что независимо от геометрического места проявления отказа в исследуемой системе (объекте) предельное значение нагрузки является характеристикой его сопротивляемости как целого, а не сопротивляемости той

его части, в которой произошло разрушение. В этом случае, когда на некоторую группу элементов, агрегатов, устройств сложной технической динамической системы действует одна и та же нагрузка, а характеристики сопротивляемости этих элементов, агрегатов, устройств этой нагрузки различны и равны соответственно $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_m$, то совместная плотность распределения сопротивляемости системы (объекта) может быть представлена распределением смеси

$$\phi_{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m}(x) = \eta_1 \phi_{\bar{x}_1}(x) + \eta_2 \phi_{\bar{x}_2}(x) + \dots + \eta_m \phi_{\bar{x}_m}(x), \quad (9)$$

где $\sum_{i=1}^m \eta_i = 1$, η_i – весовой коэффициент, определяющий долю элементов, агрегатов, устройств с данной плотностью распределения сопротивляемости i -го элемента в системе; $\phi_{\bar{x}_i}$ – плотность распределения сопротивляемости i -го элемента (агрегата, устройства).

Модель расчета надежности по величине разности (СВ) нагрузки \bar{u} и сопротивляемости \bar{x} .

Более информативной моделью по сравнению с вышерассмотренной является модель расчета показателей надежности, построенная на основе описания отказа в форме двуместного неопределенного предиката [7]

$$\bar{A}_{\bar{x}}(\bar{x} - \bar{u}),$$

где $\bar{A}_{\bar{x}}$ – случайное событие, зависящее от (СВ) \bar{x} . Предикат, т.е. высказывание $x > u$ относительно возможности безаварийной и безотказной работы системы (объекта), в данном случае становится дважды неопределенным [1]. (Случайное событие $\bar{A}_{\bar{x}}(\bar{u} > \bar{x})$ – условие отказа, а случайное событие $\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}(\bar{u} > \bar{x})$ – условие безотказной работы).

Задача. Определить вероятность события $\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}$. Для решения этой задачи надо найти закон совместного распределения случайного вектора $\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle$. Предположим, что плотность совместного распределения $\phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(\bar{u}, \bar{x})$ СВ \bar{x} и \bar{u} известна. Тогда вычисления вероятности события $\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}$ можно осуществить по формуле [1]

$$P(\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}) = P(\bar{u} \leq \bar{x}) = P(\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle \in (H)) = \iint_{(H)} \phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(u, x) du dx, \quad (10)$$

где $(H) = \{ \langle u, x \rangle: u < x \}$ – область, в которой выполняется условие $u < x$.

Преобразуем (10) к одной из следующих форм:

$$\begin{aligned} P(\bar{u} \leq \bar{x}) &= \iint_{(H)} \phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(u, x) du dx = \iint_{(u \leq x)} \phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(u, x) du dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\bar{x}}(x) \left[\int_{-\infty}^x \phi_{\bar{u}/\bar{x}}(u; x) du \right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\bar{u}/\bar{x}}(x; x) dF_{\bar{x}}(x), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\phi_{\bar{u}/\bar{x}}(u; x)$ и $F_{\bar{u}/\bar{x}}(u; x)$ соответственно условная плотность и условная функция распределения случайной переменной \bar{u} относительно \bar{x} .

Другой формой выражения (10) является

$$\begin{aligned} P(\bar{x} > \bar{u}) &= \iint_{(H)} \phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(u, x) du dx = \iint_{(x > u)} \phi_{\langle \bar{u}, \bar{x} \rangle}(u, x) du dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\bar{u}}(u) \left[\int_u^{\infty} \phi_{\bar{x}/\bar{u}}(x; u) dx \right] du = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{x}/\bar{u}}(u; u) dR_{\bar{u}}(u), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\phi_{\bar{x}/\bar{u}}(x; u)$ $R_{\bar{x}/\bar{u}}(x; u)$ соответственно условная плотность и условная дополнительная функция распределения случайной переменной \bar{x} относительно \bar{u} . Оба выражения (11) и (12) служат для определения искомой вероятности $P(\hat{u} \leq \hat{x})$ и дают один и тот же результат. Однако при рассмот-

рении различных моделей типа «нагрузка – сопротивляемость» в основном будет использоваться выражение (10). Это связано со спецификой изменения нагрузок и сопротивляемости исследуемых объектов. Величину, изображенную в (12), можно трактовать как вероятность того, что отказ не произойдет (событие $\bar{A}_{\bar{x}}$), если СВ нагрузка \bar{u} в процессе работы системы (объекта) она примет некоторое значение, равное или меньше некоторого (неопределенного) значения сопротивляемости \bar{x} . Выражение (11) трактуется так: вероятность того, что отказ не произойдет (событие $\bar{A}_{\bar{x}}$), если СВ сопротивляемости \bar{x} примет некоторое значение x , больше некоторой СВ \bar{u} . Наиболее важным для практических приложений является случай, когда нагрузка и сопротивляемость не зависят друг от друга. При этом случайные величины \bar{x} и \bar{u} независимы, и формулы (11) и (12) принимают вид

$$P(\bar{u} \leq \bar{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\bar{u}}(x) dF_{\bar{x}}(x); \tag{13}$$

$$P(\bar{x} > \bar{u}) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{x}}(u) dR_{\bar{u}}(u). \tag{14}$$

Если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует взаимное однозначное соответствие, то плотность распределения сопротивляемости может быть выражена через эти параметры. В этих случаях для получения закона распределения сопротивляемости широко используется метод линеаризации или метод малых возмущений. Сущность метода линеаризации заключается в аппроксимации нелинейной, в общем случае, зависимости между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, линейной статистически эквивалентной исходной зависимости. В основу метода положено допущение о малости случайных отклонений возмущающих параметров z_j от их математических ожиданий m_{z_j} и допущение о нормальных законах распределения этих отклонений. Поэтому метод линеаризации особенно эффективен, если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует однозначная функциональная зависимость $x = f(z_j)$, где $j = 1(1)m$. Разлагая функцию связи между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами в ряд Тейлора в окрестности точки $(m_{z_1}, m_{z_2}, \dots, m_{z_m})$ относительно центрированных возмущений и сохраняя только линейные члены разложения, получим

$$X \cong (m_{z_1}, m_{z_2}, \dots, m_{z_m}) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m z_j. \tag{15}$$

По теоремам о математическом ожидании и дисперсии находим

$$m_X \cong f(m_{z_1}, m_{z_2}, \dots, m_{z_m}), \tag{16}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m^2 + \sigma_{z_j}^2 + 2 \sum_{j < i} \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \right)_m r_{z_j z_i} \sigma_{z_j} \sigma_{z_i}}, \tag{17}$$

где $r_{z_j z_i}$ – коэффициент корреляции величин z_j и z_i .

Производные $\partial f / \partial z_j$ – это коэффициенты влияния возмущений z_j на величину сопротивляемости X . Если корреляции между величинами z_j и z_i отсутствуют, то формула (17) примет вид

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m^2 \sigma_{z_j}^2}. \tag{18}$$

Таким образом, получаем модель расчета надежности функционирования сложной технической системы, выраженной в форме случайности события в форме двуместного дважды неопределенного предиката.

Библиографический список

1. Игнатов, Г. Н. Характерные отказы двигателей большого ресурса / Г. Н. Игнатов, В. В. Татаринцов // Труды ВНТК по совершенствованию методов технической эксплуатации авиационной техники. – Киев : КНИГА, 1984. – 240 с.
2. Северцев, Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – М. : Высш. шк., 2006. – 380 с.
3. Северцев, Н. А. Статистическая теория подобия в безопасности и надежности динамических систем / Н. А. Северцев. – М. : Радиотехника, 2016. – 399 с.
4. Катулев, А. Н. Метод оценки классической устойчивости не по Ляпунову функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 45–47.
5. Катулев, А. Н. Алгоритм и результаты оценки структурной безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев, И. В. Прокопьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 97–99.
6. Полтавский, А. В. Информационная система: управление замещением критерия / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 20–25.
7. Катулев, А. Н. Метод оценки показателей структурной безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 3–8.

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: safst@mail.ru

Зацаринный Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук (ФИЦ ИУ РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: azatsarinny@ipiran.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
head of division of safety and nonlinear analysis,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Zatsarinnyy Aleksandr Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
deputy director on scientific work,
Federal research center
«Computer science and control»
of Russian Academy Of Sciences (FRC CsC RAS)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Аннотация. Для обеспечения безопасной работы механических систем в условиях случайности нагрузки актуальна задача оценки надежности конструкций сложных технических систем. Для ее решения необходимо разработать модель расчета надежности случайного события, которую можно представить в форме двуместного дважды неопределенного предиката. Показано, что в случае наличия взаимно однозначного соответствия между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, плотность распределения сопротивляемости может быть выражена через эти параметры. Для получения закона распределения сопротивляемости используется метод линеаризации или метод малых возмущений, сущность которого заключается в аппроксимации нелинейной зависимости между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, с помощью линейной

Abstract. To ensure the safe operation of mechanical systems under conditions of randomness of load, the task of evaluating the reliability of structures of complex technical systems is urgent. To solve it, it is necessary to develop a model for calculating the reliability of a random event, which can be represented in the form of a two-place double-indefinite predicate. It is shown that in the case of a one-to-one correspondence between the resistance and the measured parameters, the distribution density of resistivity can be expressed through these parameters. To obtain the law of resistivity distribution, the linearization method or the method of small perturbations is used, the essence of which is to approximate the nonlinear relationship between the resistance and the measured parameters, using a linear statistically equivalent initial dependence. It is shown that under conditions of smallness of random deviations of disturbing parame-

статистически эквивалентной исходной зависимости. Показано, что в условиях малости случайных отклонений возмущающих параметров от их математических ожиданий справедливо допущение о нормальных законах распределения этих отклонений. Метод линеаризации особенно эффективен, если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует однозначная функциональная зависимость. Синтезирована модель расчета надежности функционирования сложной технической системы, выраженной в форме случайности события в форме двуместного дважды неопределенного предиката. Таким образом, разработана методология определения надежности при случайных нагрузках и случайной сопротивляемости сложных технических систем и их элементов.

Ключевые слова: надежность, случайность, нагрузка, сопротивляемость, система, событие, вероятность.

ters from their mathematical expectations, the assumption of the normal distribution laws of these deviations is valid. Therefore, the linearization method is especially effective if there is a unique functional dependence between the resistance and the measured parameters. A model is developed for calculating the reliability of a complex technical system, expressed in the form of a random event in the form of a two-place double-indefinite predicate. Thus, a methodology has been developed for determining the reliability for random loads and the random resistance of complex technical systems and their elements.

Key words: reliability, randomness, load, resistance, system, event, probability.

УДК 621.37/629.78

Северцев, Н. А.

Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы / Н. А. Северцев, А. А. Зацаринный // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 90–96. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-12.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

М. К. Казамбаев, Б. Ж. Куатов

Анализ локальных конфликтов второй половины XX и начала XXI в. предъявляет новые требования к ведению боевых действий, где все большее участие принимают высокоточные образцы вооружения и военной техники. Все большее применение и развитие получают образцы техники, не имеющие экипажей, которые на данном этапе развития науки и техники стали относиться к высокоточным образцам вооружения, управляемые с помощью радиосвязи.

Беспилотники как средство ведения современной войны «дебютировали» в 1982 г. над долиной Бека в ходе войны между Сирией и Израилем. Сирия имела сильную эшелонированную систему ПВО, выстроенную советскими военными специалистами. Даже для израильской авиации, которая к тому времени была оснащена современной американской техникой и получила солидный боевой опыт в предыдущих войнах, это был серьезный противник. Однако израильтяне, применив БЛА, сумели вскрыть расположение сирийских ЗРК. По данным, полученным с беспилотников, израильские самолеты нанесли мощный удар по сирийской ПВО в долине Бека. В результате 18 зенитно-ракетных батарей сирийцев было уничтожено [1].

С того времени в мире отмечается устойчивый интерес к комплексам с беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Это проявляется, в частности, в возрастании числа публикаций по вопросам создания и применения комплексов с БЛА, в подключении все новых стран к их разработке, непрерывном росте тактико-технических характеристик разрабатываемых комплексов, росте экспортных поставок и др. Показательно, что такой интерес проявляется как со стороны стран, имеющих хорошо технически оснащенные армии, так и со стороны ряда стран, испытывающих определенные трудности с их оснащением современным вооружением и военной техникой. При этом для первой группы стран характерно отношение к комплексам с БЛА как к одному из средств реализации новейших военно-технических концепций, для второй – как альтернативному боевому средству, позволяющему наращивать боевой потенциал войск при ограниченных расходах на разработку, производство и эксплуатацию военной техники. Создается широкая номенклатура машин – от стратегических аппаратов до мини-БПЛА, рассчитанных на индивидуальное применение военнослужащим на поле боя [2].

В настоящее время армия, не имеющая в своем составе достаточного количества БЛА и не умеющая эффективно применять их, уже не может считаться современной. Указанные факторы определяют целесообразность уточнения взглядов на роль и место комплексов с БЛА в системе вооружения ВС РК в интересах оценки перспектив развития этого вида ВВТ в Республике Казахстан.

Особую остроту в ВС РК в настоящее время приобретает проблема нехватки разведывательных средств, в особенности средств воздушной разведки, как пилотируемых, так и беспилотных. Современные комплексы с БЛА способны выполнять задачи: воздушной разведки общего и специального назначения; радиоэлектронной борьбы, включая электронную разведку, радиоэлектронное подавление радиоэлектронных средств противника, насыщение зон ПВО ложными целями; целеуказания системам оружия с лазерным наведением; корректировку артиллерийского огня; поражения наземных целей, включая поражение РЛС; обеспечения радиорелейной связи; применение в качестве воздушных мишеней.

По уровню решаемых задач, они призваны дополнить пилотируемую авиацию в той части, в которой наращивание возможностей последней невозможно или нерационально. Для казахстанских ВВС задача скорейшего создания и расширения парка комплексов с БЛА имеет и другую, не менее важную причину. Она заключается в том, что комплексы с БЛА при решении обеспечивающих и отдельных боевых задач ВВС являются альтернативой пилотируемым самолетам, которая в современных условиях может оказаться по ряду критериев более предпочтительной. Это связано, прежде всего, с тем, что при существующем уровне финансирования в ближайшие годы произойдет значительное сокращение самолетного парка по причине истечения назначенного ресурса

или календарного срока службы авиационной техники. Восстановление и наращивание возможностей ВВС возможно путем разработки и производства (закупа иностранных) комплексов с БЛА, которые требуют по крайней мере на порядок меньших расходов по сравнению с пилотируемыми самолетами, включая расходы на создание и содержание наземной инфраструктуры, подготовку и тренировку наземного персонала. Таким образом, применение комплексов с БЛА позволяет наращивать возможности пилотируемой авиации с одновременным снижением затрат на содержание авиационного парка. В последние годы определилась очевидная необходимость применения комплексов с БЛА непосредственно в войсковых структурах Сухопутных войск (СВ). К этому вынуждает, во-первых, необходимость существенного снижения времени прохождения разведывательной информации к потребителю и командной информации от органов управления к комплексу с БЛА, во-вторых, необходимость организации гибкого взаимодействия органов управления и огневых средств СВ с информационными средствами воздушного базирования, в-третьих, необходимость обеспечения применения и функционирования воздушных разведывательных комплексов непосредственно в боевых порядках СВ. Первоочередными задачами комплексов с БЛА СВ являются: воздушная разведка и информационное обеспечение применения огневых и ударных средств СВ, включая наблюдение поля боя, артиллерийскую разведку, обеспечение целеуказания, корректирование артиллерийского огня, лазерную «подсветку», доразведку объектов ударов. В числе других задач следует отметить воздушную ретрансляцию в системе связи тактического звена управления СВ и постановку помех средствам связи в тактической глубине обороны противника. Таким образом, роль комплексов с БЛА для СВ в первую очередь определяется необходимостью иметь в составе ракетных войск и артиллерии (РВиА) собственные средства воздушной разведки, отвечающие их требованиям по глубине ведения разведки, точности определения координат целей, оперативности получения информации и позволяющие обеспечить полную реализацию боевых возможностей современных и перспективных образцов РАВ по точности и дальности действия. Место разведывательных комплексов с БЛА для СВ определяется их включением в состав систем разведки войсковых формирований соответствующего уровня [2].

Правильность разработанных теоретических положений показала практика боевых действий на Ближнем Востоке, где, несмотря на некоторое техническое отставание в развитии БЛА от ведущих армий мира, ВС России в Сирии блестяще реализовали теорию на практике, применяя в основном БЛА разведывательного типа. В состав российской группировки в Сирии входило около 80 беспилотников, от легких «Элерон-3СВ» и «Орлан-10» до самых тяжелых и дальних – «Форпост». Их количество превысило суммарную численность пилотируемых самолетов и вертолетов. Такая группировка радикально повысила разведывательные возможности российских войск. Комплексы с БЛА «Форпост» и «Застава», производящиеся из израильских комплектующих, оказали существенное влияние на тактику ведения боевых операций. Объединенный штаб российской группировки в Сирии сумел успешно применить беспилотники всех родов войск совместно. Так, флотские беспилотники использовались для наблюдения за ударами не только флота, но и ВКС, а также в интересах наземных группировок союзников и России [4]. БЛА во взаимодействии с ВКС осуществляли наводку ударных самолетов с авиационными средствами поражения, контроль за поражением цели, разведку. Видеоматериалы давали возможность оценить действия экипажей, положение правительственных вооруженных сил САР, положение противника, координировать удары в связи с изменившейся обстановкой. Все это в совокупности принесло немало опыта по взаимодействию между подразделениями и войсками. Позволило грамотно вести мониторинг ситуации на ТВД. Помимо всего вышеперечисленного, БЛА помогли с помощью видеоматериалов показать честность намерений и правильность действий ВКС России, соответствие использования вооружений по всем законам, нормам и правилам ООН, международных договоров. Поэтому можно сделать вывод, что БЛА также обеспечивает необходимую информационную составляющую, которая не позволяет дискредитировать Россию в лице мирового сообщества, но позволяет вести оборону на информационной арене противостояния. Получается, что, помимо выполнения боевых задач, БЛА способствуют миру с помощью видеоматериалов, которые впервые стали пересылаться не только в штабы и командные пункты, но и на телевидение, являясь тем самым достоверным первоисточником информации, своего рода «репортером» с места событий. Это новое качество беспилотников было открыто уже российскими специалистами. Руководство РФ, анализируя положительный опыт работы БЛА, готово выделять значительные средства для закупки, разработки и реализации беспилотных комплексов. Всего за пять лет количество легких тактических беспилотников в войсках возросло в двадцать раз, а их характери-

стики приблизились к лучшим мировым образцам. Только за 2016 г. войска получили еще 105 комплексов с 260 беспилотниками и к концу 2016 г. в распоряжении Министерства обороны России уже имелось почти 2000 беспилотных летательных аппаратов.

В феврале 2014 г. министр обороны РФ С.К. Шойгу заявил: «В соответствии с принятыми программами комплексы с БЛА внедряются в полном объеме». До 2020 г. на программу по развитию и внедрению беспилотников будет израсходовано 320 млрд рублей. Соответственно, сейчас можно наблюдать уже значительный прирост отечественных беспилотников в ВС РФ.

Другой наш сосед, Китайская Народная Республика, по уровню развития беспилотной авиации входит в тройку сильнейших стран мира вместе с США и Израилем, а также является на данный момент лидером-экспортером БЛА, причем не только аппаратов для выполнения специальных задач, но и ударных (CH-4), получивших название «Птеродактиль», которые с успехом применяют в ходе боевых действий на Ближнем Востоке.

Не останавливаясь на достигнутом, по сообщению Информационного агентства «Оружие России» от 18 июля 2017 г., Китай провел успешный испытательный полет своего боевого разведывательного беспилотника Caihong-5 (CH-5 или «Цайхун-5») (рис. 1), который в настоящее время готов к серийному выпуску. Руководитель проекта Оу Чжунмин сообщил, что ряд стран уже проявили заинтересованность в покупке новейшего китайского аппарата. БЛА способен находиться в воздухе до 60 ч, максимальная дальность его полета составляет 10 тыс. км, взлетная масса достигает 3,3 т, полезная нагрузка – до 1 т. В рамках одной миссии он может нести до 24 ракет [3, 4].



Рис. 1. Боевой разведывательный беспилотник CH-5 (Фото: GlobalLookPrees/BaiGuolong)

Другим не менее важным направлением использования БЛА, является использование его для борьбы со средствами ПВО, в том числе с радиоизлучающими средствами. БЛА обладают заметными преимуществами над управляемыми ракетами «воздух – РЛС» благодаря большой продолжительности дежурства в воздухе, возможности размещения на борту различных датчиков и информационного обмена с оператором. Указанные факторы служат основанием для вывода о перспективности применения комплексов с БЛА в ударных вариантах в качестве эффективного средства для уничтожения объектов ПВО противника.

О перспективности данного вида направления говорит тот факт, что военным руководством Китая в декабре 2016 г. принято решение о проведении работ по переоборудованию устаревших реактивных истребителей типа J-6 в боевые ударные беспилотники. В составе Военно-Воздушных сил Китая и на базах хранения насчитывается на данный момент порядка 1000 J-6 самолетов. С поступлением на вооружение большого количества истребителей третьего поколения (китайская классификация четвертого поколения) легкие боевые самолеты J-7 (МиГ-21) также начали выводиться из боевого состава. Эти самолеты легко могут быть оборудованы в беспилотные крылатые ударные средства. Данные машины будут применяться для прорыва ПВО противника (как

камикадзе, на которые противник вынужден тратить ЗУР). Думаем, что это поучительный пример, как грамотно и экономно распоряжаться устаревшей техникой.

Таким образом, в условиях автоматизации управления войсками, очень важно иметь современные БЛА, выполняющие целый круг возложенных на них задач. Современные боевые действия становятся уже невыполнимыми без беспилотной авиации, а перспективы ее развития колоссальны.

Библиографический список

1. Опыт боевого применения российских беспилотных летательных аппаратов в Сирии. – URL: <http://bmpd.livejournal.com/2587680.html>.
2. Полтавский, А. В. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Р. Р. Бикеев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1(13). – С. 39–46.
3. Полтавский, А. В. Формирование обликковых характеристик беспилотных систем и комплексов / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, К. А. Айжариков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 24–30.
4. Полтавский, А. В. Модификация модели системы управления подвижным объектом / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (5). – С. 65–70.

Казамбаев Мухамедкали Кабылбекович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра сил воздушной обороны,
Национальный университет обороны имени Первого
Президента Республики Казахстан – Лидера Нации
(010000, Казахстан, г. Астана, пр. Туран, 72)
E-mail: sabinakz8282@mail.ru

Куатов Бауржан Жолдыбаевич

доктор PhD, доцент,
заместитель начальника по учебной
и научной работам,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(463024, Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kuatov.baurzhan@mail.ru

Kazambaev Muhamedkali Kabylbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of air defense forces,
National Defense University
named after the first President of the Republic
of Kazakhstan – leader of the nation
(010000, 72 Turan avenue, Astana, Kazakhstan)

Kuatov Baurzhan Zholdybaevich

PhD, associate professor,
deputy chief of academic and scientific works,
Military Institute of Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begel'dinov
(463024, 16 A. Moldagulova avenue,
Aktobe, Kazakhstan)

Аннотация. Анализируются уровень и состояние развития беспилотной авиации в системе вооружения ведущих стран мира. Приведены основные сведения по типовым комплексам беспилотных летательных аппаратов (КБЛА), дается анализ их применения. В данной статье рассматривается боевое применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в современных вооруженных конфликтах и проводится анализ направлений применения БЛА в будущем. Дается методика уточнения взглядов на роль и место комплексов БЛА в системе вооружения Вооруженных Сил Республики Казахстан.

Ключевые слова: комплекс с БЛА, состав, вооружение, высокоточное оружие.

Abstract. Described is the level and status of development of unpiloted aviation in the weapon system of the leading world countries. Brought under attention are the primary facts about typical systems of unmanned aircraft vehicles, an analysis of their application is given. In this article author considers employment of the unmanned aerial vehicles (UAV) in the modern conflicts and directions of the UAV implementation in the future, reviews the adoption of well-timed measures on opinions, specification of the role and place of the UAV complexes in the armament system of the Armed Forces of the Republic of Kazakhstan.

Key words: UAV complex, composition, weaponry, precision weapon.

УДК 421.6

Казамбаев, М. К.

Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов / М. К. Казамбаев, Б. Ж. Куатов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 97–100. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-13.