Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

7

2015

Главный редактор
Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЛЕГИЯ:

Бучаченко А.Л. — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

ООО "Издательство "Машиностроение"

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., 2А.
Тел.: (495) 661-38-80.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.
Тел.: (499) 268-38-58.
Факс: (499) 269-48-97.

© Издательство "Машиностроение",
© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2015

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Марков А.В., Халимон В.И., Маркова А.В., Юленец Ю.П. Оптимальная временная программа процесса модифицирования поверхности полимерных материалов в плазме высокочастотного разряда 3

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Федотов Ю.В., Чернавская О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный дистанционный метод обнаружения и классификации разливов нефтепродуктов на земной поверхности 7

Кай Шэнь. Разработка методов оценивания и прогнозирования навигационных систем летательных аппаратов 13

Тань Лиго, Фомичев А.В., Лю Ян. Решение задачи планирования полёта малогабаритного беспилотного летательного аппарата в условиях городской среды 19

Зотов М.Г. Алгоритм конструирования оптимального робастного регулятора для объектов на грани устойчивости . . . 25

Корнеев Н.В., Гребенников А.В. Интеллектуальная система управления для транспортного средства 28

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Познахирева И.В., Познахирев Р.С., Янишевская А.Г. Проектирование производственного процесса с использованием системы CENTUM CS3000 34

Бубырь Д.С., Булыжев Е.М., Грехов Ю.А., Клячкин В.Н., Орлов Г.А. Система прогнозирования качества питьевой воды 42

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Дегтярёв Ю.И. Модели централизованного распределения финансовых ресурсов для поддержки деятельности научно-производственных организаций 46

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Markov A.V., Khalimon V.I., Markova A.V., Yulenets Yu.P. Optimal temporal program for process modification of the polymeric material surfaces in the high-frequency discharge plasma 3

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Fedotov Yu.V., Chernavskaya O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser Remote Method of Detection and Classification of the Oil Spill on the Ground Surface 7

Kay Shen. Elaboration Methods for Evaluation and Prediction of Navigation Systems Aircraft 13

Tan Ligo, Fomichev A.V., Lyu Yan. Solution of Scheduling Problems Flight Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles in the Urban Environment 19

Zotov M.G. Algorithm Design of Optimal Robust Controllers for Objects on the Verge of Sustainability . . . 25

Korneev N.V., Grebennikov A.V. Intelligent control system for vehicle 28

MODERN TECHNOLOGY

Poznakhireva I.V., Poznakhirev R.S., Yanishevskaya A.G. Design of Production Process Using the Centum CS3000 34

Bubyr D.S., Bulyzhev E.M., Grekhov Yu.A., Klyachkin V.N., Orlov G.A. Forecasting System Drinking Water Quality 42

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Degtyarev Yu.I. Models of financial resources centralized allocation for the activities support of scientific and industrial organizations 46

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 29.04.2015.
Подписано в печать 24.06.2015.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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

© Издательство "Машиностроение",
© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2015

УДК 537 (075.8)

А.В. Марков, д-р техн. наук, доц., **В.И. Халимон,** д-р техн. наук, проф.,
А.В. Маркова, канд. техн. наук, доц., **Ю.П. Юленец,** д-р техн. наук, проф.
(Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет))
markov-av@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ ВРЕМЕННÁЯ ПРОГРАММА ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

Рассмотрена задача улучшения качественного показателя модифицирования поверхности полимеров в плазме высокочастотного разряда — устойчивости продукции к дальнейшему хранению — показателя, определяемого температурой материала в плазме. Для плёнок полиэтилена, поливинилхлорида и фторопласта различной толщины предложена оптимальная временнáя программа процесса плазменного модифицирования, обеспечивающая максимальную устойчивость свойств поверхности плазмообработанных материалов.

Ключевые слова: плазма; модифицирование поверхности полимеров; временнáя программа.

A quality index improvement problem of the polymer surface modification in high frequency discharge plasma (stability of product to further storage), determinated due to material temperature in plasma, is considered For films of polyethylene, polyvinyl chloride and teflon different thickness optimal process of plasma modification temporary program is offered. This program provides maximum stability properties of the surface of the plasma-treated materials.

Key words: plasma; polymer surface modification; temporal program.

Полимерные материалы (плёнки и волокна) характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, плохо смачиваются растворителями, практически не склеиваются, обладают плохой адгезией к напылённым слоям металлов. Обработка в низкотемпературной плазме позволяет в широких пределах изменять физико-химические, электрические, оптические и другие свойства поверхности полимеров и тем самым значительно расширяет сферу их применения. Наиболее ценным эффектом воздействия низкотемпературной плазмы на полимеры является изменение их контактных свойств: смачивание, адгезия к тонким слоям металла, способность к склеиванию, окрашиванию и т.п. [1, 2].

Среди плазменных процессов существенными преимуществами (устойчивость к контракции, равномерность обработки, неограниченный ресурс работы) отличается неравновесная плазма высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления [3]. Однако, несмотря на целый ряд достигнутых на практике положительных эффектов, промышленное применение плазмохимических методов обработки полимеров, в том числе в плазме ВЧЕ-разряда, до сих пор не соответствует их потенциальным возможностям. Большим недостатком существующего уровня развития плазменной технологии является нестабильность приобретённых свойств поверхности — плазмообработанные материалы стареют при дальнейшем хранении, и их гидрофильные свойства ухудшаются.

Наряду с внешними (задаваемыми) параметрами (давление, мощность или ток разряда), температура материала в плазме, не поддающаяся непосредственному измерению, является важнейшим и весьма критичным параметром процесса плазменного модифицирования поверхности полимеров. От значения достигнутой в момент выгрузки из реактора температуры $T_{кон}$ зависят не только вновь приобретённые свойства поверхности, но и степень их стабильности при дальнейшем хранении. В работах [4, 6] найдены значения критических температур соответственно для плёнок полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и поливинилхлорида (ПВХ): $T_{кр}$ = 70 °С и $T_{кр}$ = 80 °С. Показано, что при $T = T_{кр}$ дости-

гается оптимальный показатель качества продукции γ — наибольшая устойчивость поверхностных свойств (минимизация эффекта старения): $\gamma = \frac{\theta_{30} - \theta_0}{\theta_0} 100\ \% = \min = 10—12{,}5\ \%$; при $T < T_{кр}$ $\gamma = 18—40\ \%$; при $T > T_{кр}$ возникает опасность коробления и деформации плёнок (θ_0 — краевой угол смачивания поверхности сразу после плазменной обработки; θ_{30} — краевой угол смачивания поверхности через 30 суток хранения).

Газ в плазме нагревается практически мгновенно. Временна́я продолжительность процесса плазменного модифицирования поверхности полимеров исчисляется десятками секунд [1]. Одновременно с плазмохимическим процессом на поверхности плёнка полимера претерпевает разогрев от газоразрядной плазмы. Цель настоящей работы — определение временно́й программы достижения полимерными материалами различной толщины критических значений температуры, обеспечивающих минимизацию эффекта старения плазмообработанных плёнок.

При моделировании теплового процесса рассмотрим плазмохимический реактор ВЧЕ-разряда с материалом как многослойную систему "приэлектродный слой — разрядный промежуток — образец материала — разрядный промежуток — приэлектродный слой". Диаметр электродов много больше расстояния между ними, температура электродов постоянна (электроды охлаждаются водой). Джоулево тепло тока, вызывающее нагрев газа, выделяется внутри всего разрядного промежутка за исключением расположенных вблизи электродов тёмных слоев (слоев пространственного заряда) толщиной d_s. Распределение температуры T в каждом слое описывается уравнением нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{c_{pi}\rho_i}\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{p_i}{c_{pi}\rho_i},$$
$$i = 1, 2, 3\ (p_1 = p_3 = 0,\ p_2 = p) \qquad (1)$$

с начальным и граничными условиями:

$$T = T_o \text{ при } \tau = 0\ (0 \leqslant x \leqslant x_3), \qquad (2)$$

$$\left.\frac{\partial T_1}{\partial x}\right|_{x=0} = 0,\ T_3\big|_{x=x_3} = T_0, \qquad (3)$$

$$T_i = T_{i-1},\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i-1}\frac{\partial T_{i-1}}{\partial x} \text{ при } x = x_{i-1}$$
$$(i = 2, 3), \qquad (4)$$

где λ_i, c_{pi}, ρ_i — теплопроводность, теплоёмкость и плотность слоя; i — номер слоя; p — мощность в единице объёма; d_s — толщина приэлектродного слоя пространственного заряда; x — текущая координата: $x_0 = 0$, $x_1 = d/2$, $x_2 = (L_b/2) - d_s$, $x_3 = L_b/2$; L_b — расстояние между электродами; d — толщина образца обрабатываемого материала; τ — время.

Уравнения (1)—(4) решались численно методом конечных разностей.

Дополнительно учитывались зависимости от температуры параметров λ_i, c_{pi} и ρ_i.

Удельная мощность разряда рассчитывалась по формуле

$$p = \frac{P_d}{S(L_b - d - 2d_s)}, \qquad (5)$$

где P_d — активная мощность разряда; S — площадь электрода разрядного конденсатора.

Для определения активной мощности разряда P_d использовали метод компенсации емкостного сопротивления индуктивным [3]. Для этого в цепь разряда дополнительно включена катушка индуктивности с дискретно изменяемой точкой подключения измерителя напряжения. В момент компенсации емкостного сопротивления индуктивным ВЧ-напряжение, измеренное на разрядном конденсаторе, минимально: $U_{вч} = U_{\min}$, а активная мощность разряда запишется в виде [3, 6]

$$P_d = I_d U_{пс} = I_d(U_{\min} - U_b), \qquad (6)$$

где U_b — напряжение на добавочном (дополнительно включённом в цепь для измерения тока) активном сопротивлении R_b; $I_d = \frac{U_b}{R_b}$ — ток разряда; $U_{пс}$ — напряжение на плазме столба.

На рис. 1 в качестве примера показано температурное поле в ВЧЕ-разряде при модифицировании поверхности плёнок ПВХ различной толщины в момент времени τ при фиксированных значениях мощности разряда и давления. Плазмообразующий газ — воздух, частота электромагнитных колебаний 29,3 МГц, давление 500 Па, L_b = 20 мм, d_s = 1 мм, S = 100 см^2, p = 0,12 МВт/м^3, τ = 14 с, $T_{кр}$ = 80 °С.

Из рис. 1 следует, что толщина плёнки существенно сказывается на достигнутой конечной температуре. Если для плёнки толщиной d = 140 мкм выбранный момент времени (τ = 14 с) соответствует достижению критической температуры $T = T_{кр}$ = 80 °С, то для

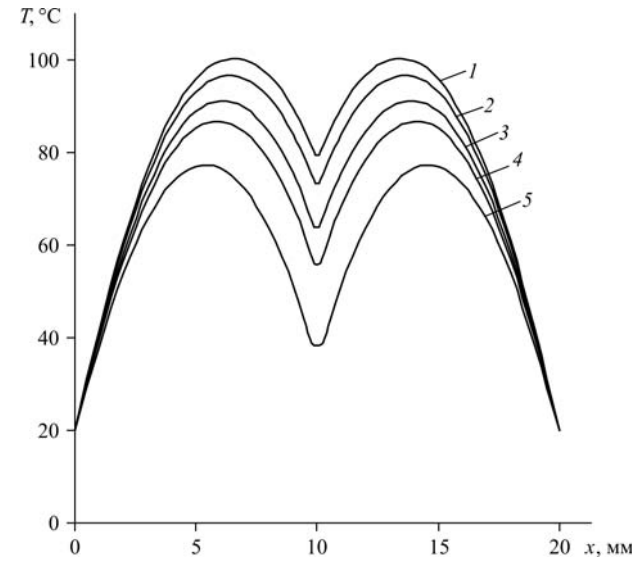

Рис. 1. Температурное поле в процессе модифицирования поверхности плёнок ПВХ в плазме ВЧЕ-разряда:
1 — d = 140 мкм; *2* — d = 160 мкм; *3* — d = 200 мкм; *4* — d = 250 мкм; *5* — d = 500 мкм

плёнки толщиной d = 500 мкм в этот же момент времени достигнутая температура составляет всего T = 38 °С.

Действительно, значительная часть выделяемой энергии расходуется на нагрев материала от газоразрядной плазмы. Соответственно, чем больше масса материала, тем более продолжительным является процесс нагрева.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчёта оптимальной временнóй программы процесса плазменного модифицирования поверхности полиэтилена и поливинилхлорида.

Следуя этой программе, можно в условиях различной задаваемой мощности разряда определить оптимальные для материалов различной толщины значения времени окончания процесса $\tau_{опт}$ (времени достижения критической температуры), при котором обеспечивается наибольшая устойчивость свойств поверхности плазмообработанных плёнок.

Таблица 1

Оптимальная временнáя программа процесса модифицирования поверхности плёнок ПЭВД в плазме ВЧЕ-разряда (расчётное время $\tau_{опт}$ достижения температуры $T_{кр}$ = 70 °С плёнкой полимера различной толщины d)

p, МВт/м^3	$\tau_{опт}$, с				
	d = 140 мкм	d = 160 мкм	d = 200 мкм	d = 250 мкм	d = 500 мкм
0,10	17,2	19,9	25,2	31,9	66,3
0,12	13,9	16,1	20,4	25,8	57,9
0,15	10,9	12,6	16,0	20,2	56,2
0,20	8,1	9,4	11,9	15,0	30,9
0,25	6,5	7,5	9,5	12,1	24,8

Таблица 2

Оптимальная временнáя программа процесса модифицирования поверхности плёнок ПВХ в плазме ВЧЕ-разряда (расчётное время $\tau_{опт}$ достижения температуры $T_{кр}$ = 80 °С плёнкой полимера различной толщины d)

p, МВт/м^3	$\tau_{опт}$, с				
	d = 140 мкм	d = 160 мкм	d = 200 мкм	d = 250 мкм	d = 500 мкм
0,10	23,4	27,0	34,3	43,4	90,0
0,12	19,1	22,0	28,0	35,4	73,3
0,15	15,1	17,4	22,1	28,0	57,8
0,20	11,3	13,0	16,5	20,9	43,1
0,25	9,1	10,5	13,3	16,9	34,7
0,30	5,5	6,3	8,0	10,1	20,8

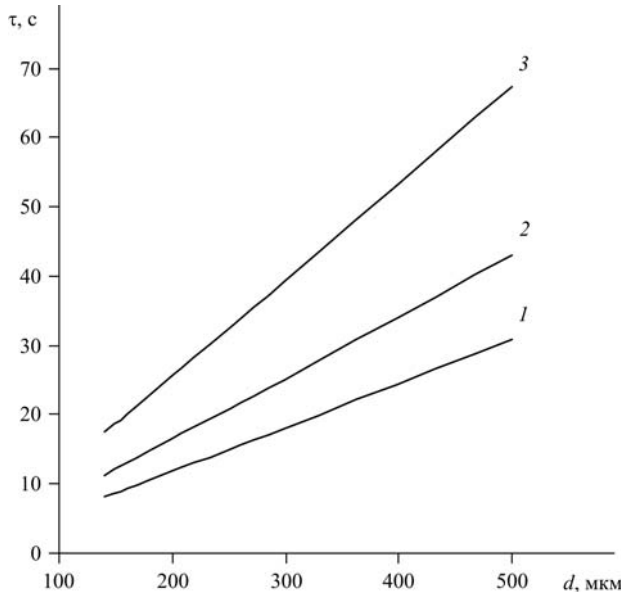

Рис. 2. Зависимость оптимальной временной продолжительности процесса плазменного модифицирования поверхности полимеров от толщины материала:
1 — полиэтилен высокого давления ($T_{кр}$ = 70 °С); *2* — поливинилхлорид ($T_{кр}$ = 80 °С); *3* — фторопласт-4 ($T_{кр}$ = 110 °С)

Расчёты выполнены таким образом, чтобы время процесса не превышало 30 с. Это обусловлено тем, что согласно работам [1, 7] при $\tau < 30$ с плазменное модифицирование в атмосфере воздуха сопровождается присоединением к молекулярной структуре поверхностных слоев полимера кислородсодержащих групп; при $\tau > 30$ с доминирующий характер приобретает травление поверхности — плазмоокислительная деструкция.

На рис. 2 построены зависимости оптимального (в отношении наибольшей устойчивости свойств поверхности плазмообработанных плёнок) времени процесса плазменного модифицирования от толщины материала при фиксированной мощности разряда.

Из этих данных, распространённых дополнительно на фторопласт — 4, следует, что с увеличением толщины плёнки оптимальная временна́я продолжительность процесса линейно возрастает. Интересно отметить, что для полиэтилена оптимальная временна́я продолжительность процесса оказывается больше, чем для поливинилхлорида, несмотря на более низкую критическую температуру. Это объясняется тем, что комплекс $c_{p1}\rho_1$ ($T_{кр} - T_о$) у ПЭВД больше, чем у ПВХ. В результате для нагрева одного и того же объёма материала требуется большее количество теплоты.

Библиографические ссылки

1. **Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И.** Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука. 2004. 496 с.

2. **Энциклопедия** низкотемпературной плазмы. Тематический том XI-5 /Под ред. Ю.А. Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова. М.: Янус — К. 2006. С. 85.

3. **Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.** Высокочастотный емкостный разряд. М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1995. 320 с.

4. **Юленец Ю.П., Самсонов А.Г., Малыгин А.А.** и др. Способ модифицирования поверхности полиэтилена // Патент России № 2443558. 2012. Бюл. № 6.

5. **Юленец Ю.П., Трифонов С.А., Стрекалова В.В., Марков А.В., Бузыкина О.Н.** Модифицирование поверхности и устойчивость поверхностных свойств полимеров при воздействии плазмы высокочастотного разряда // Известия СПб. гос. технол. ин-та (техн. ун-та), 2010. № 35. С. 18—20.

6. **Ковальчук А.В., Юленец Ю.П.** Автоматизированная система управления процессом модифицирования поверхности полимерных материалов в плазме высокочастотного разряда // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2013. № 7. С. 1—5.

7. **Энциклопедия** низкотемпературной плазмы. Вводный том III / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. С. 374—382.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,

можно найти на сайте **www.mashin.ru**

УДК 535.338.41

Ю.В. Федотов, канд. техн. наук, **О.А. Чернавская**, канд. техн. наук,
М.Л. Белов, д-р техн. наук, проф., **В.А. Городничев,** д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

fed@bmstu.ru

ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрен лазерный метод обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности. Приведены экспериментальные спектры флуоресценции нефтепродуктов и различных земных поверхностей. Показано, что метод, использующий длину волны возбуждения 266 нм, регистрацию флуоресцентного излучения в трёх спектральных диапазонах с центральными длинами волн 332, 352, 418 нм и рассеянного излучения на длине волны 266 нм, позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильного обнаружения большей 0,98. Использование ещё двух спектральных диапазонов с центральными длинами волн 339 и 359 нм позволяет проводить классификацию по трём типам — лёгкие и тяжёлые нефтепродукты, сырая нефть с вероятностью правильной классификации больше 0,96.

Ключевые слова: лазер; спектры лазерно-индуцированной флуоресценции; нефтяные загрязнения; земная поверхность.

Laser method for the detection and classification of oil pollution on the earth's surface is considered. Experimental fluorescence spectra of petroleum products and various the earth surfaces are given. It is shown that the method using excitation wavelength of 266 nm and detection of fluorescence radiation in three spectral ranges with central wavelengths of 332, 352, 418 nm, and the scattered radiation at a wavelength of 266 nm, allows to detect oil pollution with a greater probability of correct detection more than 0.98. The use of two other spectral bands with central wavelengths of 339 and 359 nm allows to carry out for the classification of three types: light and heavy petroleum products, crude oil with a probability of correct classification of more than 0.96.

Key words: laser; laser-induced fluorescence spectra; oil pollution; earth's surface.

Введение. На сегодняшний день актуальной является проблема загрязнения нефтепродуктами водной и земной поверхностей [1—3].

Исторически сложилось, что сначала решалась задача контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности, так как больший процент аварий происходил при транспортировании нефти танкерами и при добыче нефти на морском шельфе. Для водной поверхности к настоящему времени разработаны и созданы различные лазерные (в основном флуоресцентные и спектрофотометрические) методы и приборы, предназначенные для контроля нефтяных загрязнений [4—8].

Однако не менее актуальной является задача обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности [9]. Существующие в настоящее время системы контроля утечек на трубопроводах не регистрируют утечки с интенсивностью менее 1 % [10]. Одним из вариантов системы обнаружения утечек с интенсивностью менее 1 % может быть система дистанционного мониторинга нефтяных загрязнений земной поверхности с летательного аппарата. Оперативные методы обнаружения нефтяных загрязнений позволяют принять меры по быстрому устранению загрязнения, а классификация загрязнений — выявить источник загрязнения и определить адекватные меры по ликвидации загрязнения.

Дистанционный контроль нефтяных загрязнений на земной поверхности может быть реализован лазерным флуоресцентным методом. Задача лазерного флуоресцентного контроля нефтяных загрязнений на земной поверхности гораздо сложнее, чем задача лазерного флуоресцентного контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности. Во-первых, флуоресцентный сигнал от нефтяного загрязнения на земной поверхности, как правило, существенно меньше флуоресцентного сигнала от нефтяного загрязнения на поверхности воды, так как нефтепродукты впитыва-

ются почвой, стекают вниз под уклон и т. д. Во-вторых, флуоресцентный сигнал от нефтяного загрязнения сравним с флуоресцентным сигналом от природных образований, находящихся на земной поверхности, например растительности и водных объектов.

Ниже проводятся исследования возможностей лазерного флуоресцентного метода обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности. Метод позволяет проводить обнаружение загрязнений и их классификацию по четырём группам: земная поверхность (незагрязнённая нефтепродуктами); загрязнения лёгкими очищенными нефтепродуктами (бензины, керосины), сырой нефтью; тяжёлыми нефтепродуктами (дизельное топливо, масло).

Лабораторная установка и методика эксперимента. Создание методов обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности осложняется отсутствием достаточного количества экспериментальных данных. На сегодняшний день данных о спектрах флуоресценции чистых (не загрязнённых нефтепродуктами) земных поверхностей для длин волн возбуждения флуоресценции, используемых для контроля нефтяных загрязнений, очень мало. Причём аналогичные данные о спектрах флуоресценции земных поверхностей, загрязнённых нефтепродуктами, отсутствуют вообще.

Поэтому первый этап работы посвящён экспериментальным исследованиям спектров флуоресценции земных поверхностей и нефтепродуктов, их обработке, систематизации и анализу.

Для исследования спектров флуоресценции создана лабораторная установка, структурная схема которой приведена на рис. 1. Длина волны возбуждения флуоресценции была выбрана 266 нм — одна из наиболее перспективных длин волн для мониторинга нефтяных загрязнений.

Лабораторная установка позволяет измерять спектры флуоресценции в диапазоне

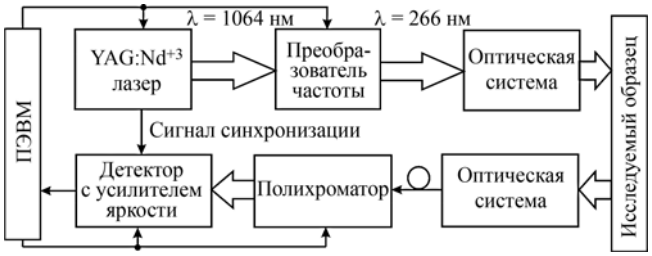

Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки

от 295 до 740 нм, а также интенсивность рассеянного земной поверхностью лазерного излучения на длине волны возбуждения 266 нм. В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции использовался лазер на YAG:Nd с преобразованием частоты в 4-ю гармонику, формирующий импульсы с энергией 0,7 мДж, длительностью импульса 6 нс и расходимостью 3 мрад.

Излучение флуоресценции поступает на вход приёмной оптической системы, вводится в оптическое волокно, и далее на вход спектрографа, который оснащён матричным детектором с усилителем яркости, обладающим высокой чувствительностью, позволяющей регистрировать одноэлектронные события. Лабораторная установка является полностью автоматизированной. Спектры флуоресценции регистрировались со спектральным разрешением 5 нм.

На лабораторной установке измерялись спектры флуоресценции чистых нефтепродуктов (нефть Альметьевская, дизельное топливо, керосин, бензин А-80, А-92, А-95, А-95 Shell, А-98, масло машинное отработанное, масло машинное Castrol 10w40); различных типов земных поверхностей: воды (водопроводной, снеговой, со взвесью чернозёма, глины, песка), растительности (листья деревьев, мох, салат, трава), почвы (чернозём, глина, торф, песок, песчаная почва, известняк, почва из соснового бора, из березовой рощи, из дубравы и др.), асфальта и нефтепродуктов, разлитых на различных земных поверхностях.

Измеренные спектры флуоресценции в дальнейшем использовались в качестве исходных данных для разработки методов обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Результаты экспериментов и их обсуждение. На рис. 2—6 представлены примеры измеренных спектров флуоресценции. Показаны спектры флуоресценции разных типов нефтепродуктов, воды, хлорофилла, асфальта (см. рис. 2); чистого и разлитого на разных поверхностях керосина (см. рис. 3); чистого и разлитого на разных поверхностях дизельного топлива (см. рис. 4); воды с различной взвесью (см. рис. 5); разных почв (см. рис. 6). На рис. 2—6 приведены спектры флуоресценции, нормированные на интенсивность рассеянного излучения на длине волны 266 нм.

По результатам экспериментальных исследований был сформирован банк данных спектров лазерно-индуцированной флуоресцен-

ции незагрязнённых и загрязнённых нефтепродуктами земных поверхностей, который содержит информацию о более 850 исследованных образцах. Для каждого экспериментального образца в банке данных имеется информация об интенсивности излучения флуоресценции на длинах волн от 295 до 700 нм, интенсивности рассеянного излучения и информация об условиях проведения эксперимента.

Результаты экспериментальных исследований спектров флуоресценции показывают:

уровень интенсивности флуоресценции почв (незагрязнённых нефтепродуктами) примерно на два порядка меньше уровня интенсивности флуоресценции нефтяных загрязнений (сравнить рис. 6 и рис. 2—5);

уровень интенсивности флуоресценции незагрязнённых образцов растительности, воды и асфальта сравним с уровнем флуоресценции нефтяных загрязнений, однако спектры флуоресценции существенно отличаются (см. кривые на рис. 2);

у одного и того же нефтепродукта на различных почвах изменяется интенсивность флуоресценции, но форма спектра во многом сохраняется (см. кривые на рис. 3, 4);

спектры флуоресценции лёгких и тяжёлых нефтепродуктов и сырой нефти отличаются

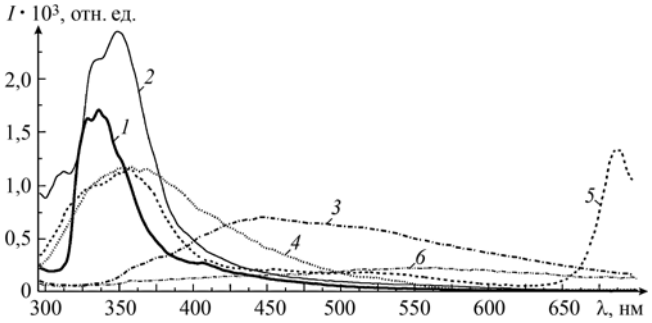

Рис. 2. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции разных типов нефтепродуктов, воды, хлорофилла, асфальта:

1 — бензин А92 на глине; *2* — масло машинное Castrol 10w40 на песчаной почве; *3* — нефть Альметьевская на торфе; *4* — вода с взвесью чернозёма; *5* — мох; *6* — асфальт

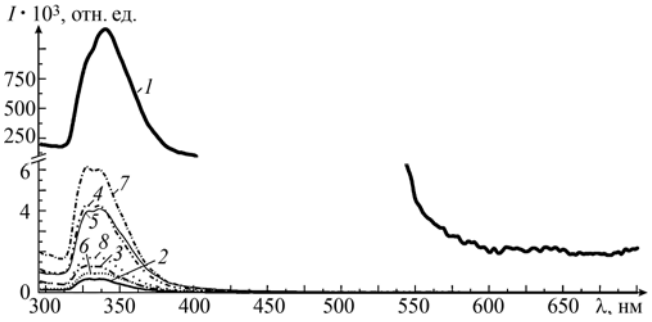

Рис. 3. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции чистого и разлитого на разных поверхностях керосина:

1 — чистый керосин; *2—8* — загрязнённые керосином чернозём, глина, известняк, песок, песчаная почва, торф, почва из соснового бора соответственно

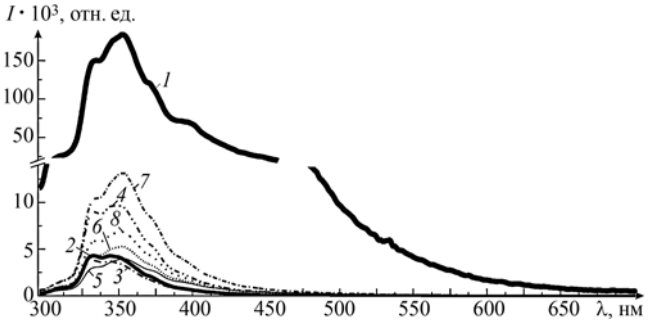

Рис. 4. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции чистого и разлитого на разных поверхностях дизельного топлива:

1 — чистое дизельное топливо; *2—8* — загрязнённые дизельным топливом чернозём, глина, известняк, песок, песчаная почва, торф, почва из соснового бора соответственно

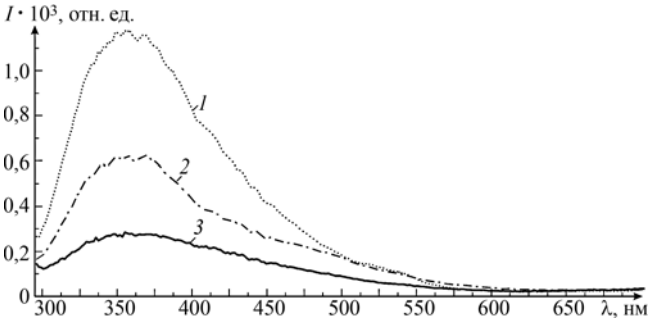

Рис. 5. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции воды с различной взвесью:

1—3 — вода со взвесью чернозёма, глины, песка соответственно

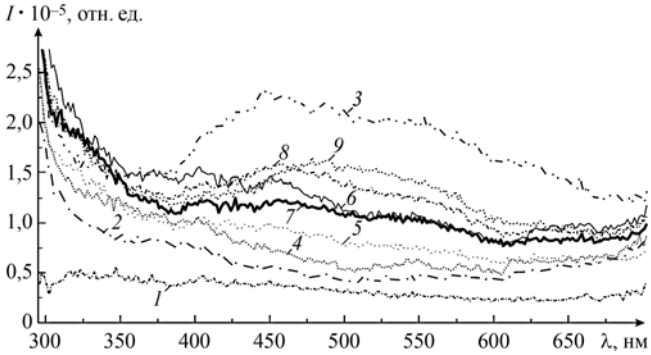

Рис. 6. Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции разных почв:

1 — чернозём; *2* — глина; *3* — известняк; *4* — песок; *5* — песчаная почва; *6* — торф; *7* — почва из соснового бора; *8* — почва из березовой рощи; *9* — почва из дубрав

между собой и от спектров флуоресценции незагрязнённых элементов земного ландшафта (см. кривые на рис. 2).

Так как спектры флуоресценции лёгких и тяжёлых нефтепродуктов, сырой нефти отличаются между собой и от спектров флуоресценции незагрязнённых элементов земного ландшафта, это даёт потенциальную возможность обнаруживать и классифицировать нефтяные загрязнения регистрацией и анализом формы спектра флуоресценции исследуемого участка поверхности.

Метод обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности. С точки зрения практической реализации измерительной аппаратуры для мониторинга нефтяных загрязнений наиболее простым вариантом является использование не всего измеряемого спектра флуоресценции, а регистрация флуоресцентного излучения только в нескольких (специально выбранных) узких спектральных диапазонах.

Вопрос о выборе из широкого спектра флуоресценции лишь некоторого количества узких спектральных диапазонов решался методом математического моделирования на основе экспериментально измеренных спектров флуоресценции (перебирались комбинации спектральных диапазонов, вычислялась вероятность правильного обнаружения и вероятность ложных тревог, определялись спектральные диапазоны, которые обеспечивают максимальную вероятность правильного обнаружения при приемлемом значении вероятности ложных тревог).

Результаты математического моделирования показывают, что задачу мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности целесообразно решать в *два этапа.*

На *первом этапе* решается задача обнаружения нефтяных загрязнений.

Для задачи обнаружения нефтепродуктов на фоне почв, растительности, воды и асфальта можно ограничиться тремя узкими спектральными диапазонами (шириной $\Delta\lambda = 8$ нм) с центральными длинами волн $\lambda_1 = 314$, $\lambda_2 = 335$ и $\lambda_3 = 400$ нм.

Этап обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности состоит из двух подэтапов.

Подэтап 1.1. Пороговый алгоритм, предназначенный для исключения почв с низким уровнем интенсивности флуоресценции, основан на сравнении суммы интенсивностей флуоресценции (нормированных на интенсивность рассеянного излучения на длине волны 266 нм) в трёх спектральных каналах с пороговым значением:

если $I(\lambda_1) + I(\lambda_2) + I(\lambda_3) \leqslant K1$, то «почвы», иначе «не почвы»,

где $K1 = 3\cdot10^{-4}$.

Подэтап 1.2. Анализ формы спектров флуоресценции, предназначенный для исключения незагрязнённых земных поверхностей (растительности, воды и асфальта). Для анализа формы спектров флуоресценции используются два классифицирующих признака $\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}$, $\frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)}$ и две пороговые величины $K2 = 1{,}80$ (для отношения $\frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}$) и $K3 = 1{,}75$ (для отношения $\frac{I(\lambda_3)}{I(\lambda_1)}$). Алгоритм проверки принадлежности к одному из классов «нефтяное загрязнение» и «незагрязнённая земная поверхность» имеет вид:

если $I(\lambda_2)/I(\lambda_1) \geqslant K2$ и $I(\lambda_3)/I(\lambda_1) \geqslant K3$, то «нефтяное загрязнение», иначе «незагрязнённая земная поверхность».

Оптимальные (с точки зрения максимизации вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений при приемлемом значении вероятности ложных тревог) значения порогов $K1$, $K2$ и $K3$ были выбраны по результатам математического моделирования.

На *втором этапе* решается задача классификации по трём типам нефтепродуктов: лёгкие, тяжёлые, сырая нефть.

Для задачи классификации по трём типам нефтепродуктов можно ограничиться тремя (но другими) узкими спектральными диапазонами (шириной $\Delta\lambda = 8$ нм) с центральными длинами волн $\lambda_4 = 339$, $\lambda_5 = 359$ и $\lambda_2 = 335$ нм (последний спектральный диапазон совпадает с одним из спектральных диапазонов, используемых для задачи обнаружения).

Этап классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности также состоит из *двух подэтапов* (причём задача классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности может быть решена только после предварительного этапа обнаружения нефтяных загрязнений).

Подэтап 2.1. Разделение классов «лёгкие нефтепродукты» и «тяжёлые нефтепродукты».

Для анализа формы спектров флуоресценции и разделения классов «лёгкие нефтепродукты» и «тяжёлые нефтепродукты» используются два классифицирующих признака $\frac{I(\lambda_4)}{I(\lambda_2)}$ и $\frac{I(\lambda_5)}{I(\lambda_2)}$.

Алгоритм проверки принадлежности к одному из классов «лёгкие нефтепродукты» и «тяжёлые нефтепродукты» имеет вид:

если $aI(\lambda_4)/I(\lambda_2) + bI(\lambda_5)/I(\lambda_2) + c \geqslant 0$,
то «тяжёлые нефтепродукты»,
иначе «лёгкие нефтепродукты»,

где $a = -18{,}3$, $b = 43{,}1$, $c = -28{,}7$ — коэффициенты, выбранные методом опорных векторов.

Подэтап 2.2. Разделение классов «сырая нефть» и «лёгкие нефтепродукты» или «тяжёлые нефтепродукты».

Алгоритм проверки принадлежности к одному из классов «сырая нефть», «лёгкие нефтепродукты» или «тяжёлые нефтепродукты» имеет вид:

если $I(\lambda_3)/(\lambda_5) \geqslant K$, то «сырая нефть»,
иначе «лёгкие нефтепродукты»
или «тяжёлые нефтепродукты»,

где $K1 = 1{,}15$.

Для определения эффективности описанного выше алгоритма обнаружения находились оценка вероятности правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности (вероятности обнаружения нефтяных загрязнений, когда они действительно присутствуют) и вероятности ложных тревог (вероятности обнаружения нефтяных загрязнений, когда их в действительности нет).

Результаты математического моделирования показывают, что вероятность правильного обнаружения (по всему измеренному авторами массиву спектров флуоресценции) составляет 0,98, а вероятность ложных тревог 0,007.

Верификация разработанного метода проводилась по спектрам флуоресценции, полученным другими авторами для длины волны возбуждения 266 нм. Для верификации были использованы спектры флуоресценции следующих веществ: хлорофилл: водоросль хлорелла [11], водоросль хлорококкум [11], кукуруза [12]; вода: модельная проба воды [13], бидистиллированная [5], дистиллированная [14, 15], медицинская [5], вода, очищенная на установке Милли-Q [5]; нефтепродукты: нефть Каспийская [14], Ливийская [16], керосин [16], дизельное топливо [16, 19], машинное масло [17], бензин [14, 18].

Результаты верификации показывают, что вероятность правильного обнаружения (по всем указанным выше нефтепродуктам [14—19]) составляет 0,92, а вероятность ложных тревог (по всем указанным выше типам воды и хлорофилла [5, 11—15]) — 0,07. Этот результат можно признать вполне удовлетворительным, учитывая очень немногочисленный и разнородный объём данных, по которому проводилась верификация.

Для оценки эффективности описанного алгоритма классификации находилась вероятность классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Результаты математического моделирования показывают, что вероятности правильной классификации нефтепродуктов на земной поверхности (по всему измеренному авторами массиву спектров флуоресценции) больше 0,96.

Верификация разработанного метода классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности проводилась по описанным выше спектрам флуоресценции, полученным другими авторами для длины волны возбуждения 266 нм. Результаты верификации показывают, что вероятности правильной классификации нефтепродуктов больше 0,8. Учитывая небольшой объём данных, можно сделать вывод, что верификация разработанного метода подтвердила его работоспособность.

Оценка возможности дистанционных измерений. Для оценки возможности дистанционных измерений проводился энергетический расчёт лазерного флуориметра для обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Особенностью длины волны возбуждающего излучения 266 нм является необходимость учёта (при энергетическом расчёте) поглощения озоном в земной атмосфере (озон сильно поглощает в ультрафиолетовом диапазоне излучение с длиной волны короче 0,32 мкм). Однако влияние поглощения озоном для рассматриваемой задачи контроля нефтяных загрязнений с авиационного носителя невелико по двум причинам:

поглощение атмосферным озоном ультрафиолетового излучения происходит в основном в верхних слоях атмосферы, а в тропосфере содержание озона невелико [20];

полёт авиационного носителя (например, беспилотного летательного аппарата) может осуществляться на относительно небольших высотах.

Данные работы [21] показывают, что величина показателя ослабления излучения вследствие молекулярного рассеяния и поглощения озоном для длины волны 266 нм составляет порядка 1 км$^{-1}$. Поэтому для высоты полёта авиационного носителя 100 м пропускание атмосферы (из-за молекулярного рассеяния и поглощения озоном) равно ~ 0,9, т. е. ослабление озоном не является существенным фактором.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования показывают, что лазерный дистанционный метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на использовании длины волны возбуждения 266 нм, регистрации флуоресцентного излучения в трёх узких спектральных диапазонах с центральными длинами волн 332, 352, 418 нм и рассеянного излучения на длине волны 266 нм, позволяет надёжно обнаруживать нефтяные загрязнения с вероятностью правильного обнаружения большей 0,98. Добавление ещё двух узких спектральных диапазонов с центральными длинами волн 339 и 359 нм позволяет проводить классификацию нефтепродуктов по трём типам — лёгкие и тяжёлые нефтепродукты, сырая нефть с вероятностью правильной классификации больше 0,96. Это позволяет рассматривать описанный лазерный метод как один из перспективных вариантов дистанционной системы обнаружения и классификации нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Библиографические ссылки

1. **Патин С.А.** Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.

2. **Другов Ю.С., Родин А.А.** Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 270 с.

3. URL: http://www.inosmi.ru/russia/20111218/180661918.html, (дата обращения 20.03.2015).

4. **Межерис Р.** Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир,1987. 550 с.

5. **Орлов В.М., Самохвалов И.В., Белов М.Л., Шаманаев В.С., Клинкин В.М., Белохвостиков А.В., Пеннер И.Э., Сафин Р.Г., Юдовский А.Б.** Дистанционный контроль верхнего слоя океана. Новосибирск: Наука. Сибирское Отделение, 1991. 149 с.

6. **Климкин В.М., Соковиков В.Г., Федорищев В.Н.** Новые возможности дистанционного анализа нефтепродуктов на поверхности вод // Оптика атмосферы и океана. 1993. № 2 (6). С. 189—204.

7. **Оптико-физические** средства исследования океана [Под ред. Е.Г. Пащенко]. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.

8. **Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Козинцев В.И.** Лазерный метод контроля тонких плёнок нефтепродуктов на водной поверхности, основанный на измерении первой и второй производных коэффициента отражения // Оптика атмосферы и океана. 2011. № 7(24). С. 568—571.

9. URL: http://stroyprofile.com/archive/447 (дата обращения 20.03.2015).

10. URL: http://www.geoim.ru/content/view/535/278 (дата обращения 20.03.2015).

11. **Patsayeva S., Yuzhakov V., Lamotte M., Fantoni R., Laiand A., Palucci A.** Laser spectroscopy of mineral oils on the water surface // Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG. June 16—17. 2000. P. 106—114.

12. **Middleton E., McMurtrey J.E., Campbell P.K.E., Corp L.A., Butcher L.M., Chappelle E.W.** Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes // Proc. of SPIE. 2003. V. 4879. P. 72—83.

13. **Глушков С.М., Фадеев В.В., Филиппова Е.М., Чубаров В.В.** Проблема лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах // Оптика атмосферы и океана. 1994. № 4 (7). С. 433—449.

14. **Власов Д.В., Ципенюк Д.Ю., Вартапетов С.К., Букреев В.С., Обидин А.З.** Исследование возможности применения эксимерного Kr-F-лазера в лидарных экспериментах по детектированию нефтяных пленок на поверхности воды // Оптика атмосферы и океана. 1990. № 11(3). С. 1224—1225.

15. **Sivaprakasam V., Killinger D.K.** Tunable ultraviolet laser-induced fluorescence detection of trace plastics and dissolved organic compounds in water // Applied Optics. 2003. N. 33(42). P. 6739—6746.

16. **Patsayeva S., Yuzhakov V., Fadeev V.V.** Fluorescent remote diagnostics of oil pollutions: oil in films and oil dispersed in the water body // EARSeL Advances in Remote Sensing. 1995. N. 3(3). P. 170—178.

17. **Laser** fluorosensor for oil spot detection / R. Karpicza [et al.] // Lithuanian Journal of Physics. 2005. N. 3(45). P. 213—218.

18. **Дейдан Таер Абд, Пацаева С.В., Фадеев В.В., Южаков В.И.** Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объёме воды // Оптика атмосферы и океана. 1994. № 4(7). С. 455—463.

19. **Löhmannsröben H.-G., Schober L.** Combination of laser-induced fluorescence and diffuse-reflectance spectroscopy for the in situ analysis of Diesel-fuel-contaminated soils // Applied Optics. 1999. N. 7(38). P. 1404—1410.

20. **URL:** http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/node29.html (дата обращения 20.03.2015).

21. **Андреев Г.А., Бисярин В.П., Соколов А.В., Стрелков Г.М.** Распространение лазерного излучения в атмосфере Земли. Итоги науки и техники. сер. Радиотехника. М.: ВИНИТИ, 1977. Т. 2. 148 с.

УДК 681.518

Кай Шэнь
(Нанкинский университет науки и технологии, КНР)
shenkaichn@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Представлены алгоритмы коррекции навигационных систем, оценивания и прогнозирования. Рассмотрены нелинейные фильтры Калмана, используемые в схемах коррекции навигационных систем в выходном сигнале. При исчезновении сигналов от внешних измерительных систем применяется коррекция с помощью прогнозирующих моделей погрешностей базовой навигационной системы. Для построения прогнозирующих моделей использованы подход самоорганизации и генетический алгоритм.

Ключевые слова: навигационная система; алгоритм оценивания; алгоритм прогнозирования; подход самоорганизации; генетический алгоритм.

Correction algorithms navigation systems, estimation and prediction are presented. Nonlinear Kalman filter used in diagrams correction navigation systems in the output signal are considered. With the disappearance of the signals from the external measuring systems correction is applied by using predictive modeling errors basic navigation system. For the construction of predictive models of self-organization approach and genetic algorithm are used.

Key words: navigation system; estimation algorithm; prediction algorithm; approach of self-organization; genetic algorithm.

Введение. Успешное решение задач управления летательными аппаратами (ЛА) во многом определяется уровнем развития измерительной техники, а эксплуатационные характеристики ЛА определяются в большей степени совершенством бортового оборудования, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов, используемых для управления.

Информационно-измерительные сигналы поступают от измерительных систем ЛА, в качестве которых используются различные инерциальные навигационные системы (ИНС), спутниковые навигационные системы (GPS, ГЛОНАСС), радиолокационные системы (РЛС) и др. Измерительные сигналы этих систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Точность измерительной информации можно повысить конструкторским и алгоритмическим подходами. Разработка новых конструкций измерительных систем требует новой технологической базы и больших финансовых затрат. Алгоритмический подход позволяет существенно повысить точность определения навигационных параметров с использованием измерительных систем современного уровня точности [1, 2].

Алгоритмы коррекции навигационных систем. Алгоритмическая коррекция навигационных систем осуществляется с помощью компенсационных сигналов, которые получены на основе анализа и испытаний навигационных систем. Примером такой коррекции является способ компенсации динамического дрейфа гиростабилизированной платформы (ГСП) на основе сигналов с датчиков углов прецессии, алгоритмов компенсации теплового дрейфа поплавковых гироскопов, предварительной фильтрацией сигналов РЛС и др.

Наиболее полная компенсация погрешностей ИНС проводится алгоритмической обработкой информации с ИНС и дополнительным внешним по отношению к ИНС датчиком навигационной информации [3]. Погрешности в выходной информации системы обычно компенсируются алгоритмами оценивания [4, 5].

ИНС имеет погрешности, обусловленные возмущающими факторами различной природы. При функционировании ИНС в режиме коррекции от внешних измерительных систем используется компенсация её погрешностей с помощью алгоритмов оценивания. В автономном режиме работы ИНС применяются прогнозирование и последующая компенсация погрешностей в выходном сигнале системы (если автономному режиму работы ИНС предшествовал режим коррекции от внешних измерителей) или методы формирования компенсационных сигналов, основанные на приближённом формировании угловых скоростей ГСП вокруг осей стабилизации как функции

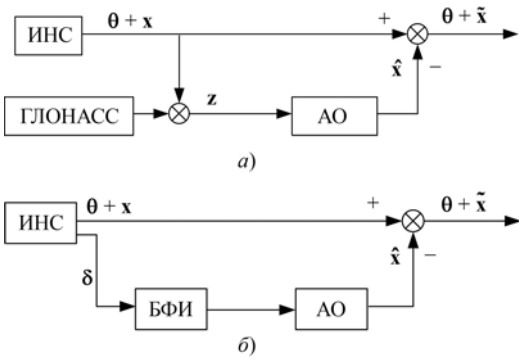

Рис. 1. Структурные схемы коррекции ИНС с алгоритмом оценивания:
а — структурная схема коррекции ИНС; *б* — структурная схема коррекции автономной ИНС; АО — алгоритм оценивания; БФИ — блок формирования измерений; $\boldsymbol{\theta}$ — истинная информация о навигационных параметрах динамического объекта; $\mathbf{x}$ — вектор погрешностей ИНС; $\mathbf{z}$ — вектор измерений; $\boldsymbol{\delta}$ — сигнал с датчика угла прецессии; $\hat{\mathbf{x}}$ — оценка вектора $\mathbf{x}$; $\tilde{\mathbf{x}}$ — вектор ошибок оценивания

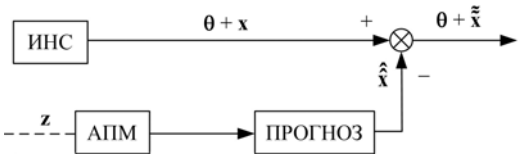

Рис. 2. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом прогноза:
АПМ — алгоритм построения модели; $\boldsymbol{\theta}$ — истинная информация о навигационных параметрах динамического объекта; $\hat{\hat{\mathbf{x}}}$ — прогноз вектора $\mathbf{x}$; $\tilde{\tilde{\mathbf{x}}}$ — вектор ошибок прогнозирования

соответствующих углов прецессии. Аналогичным образом формируется вектор измерений для алгоритма оценивания при коррекции автономной ИНС.

Структурные схемы ИНС, корректируемой от внешней измерительной системы, с алгоритмом оценивания (*а*) и автономной ИНС (*б*) представлены на рис. 1.

Структурная схема ИНС с использованием алгоритма построения модели при отключении внешнего датчика представлена на рис. 2.

Алгоритмы оценивания. Алгоритмы оценивания применяются для компенсации погрешностей в выходном сигнале измерительной системы. С помощью алгоритма оценивания проводится оценка погрешностей навигационной системы, которая затем алгебраически вычитается из выходного сигнала системы. Таким образом, компенсируется большая часть погрешностей навигационной системы.

Часто в качестве алгоритма оценивания используется фильтр Калмана или его адаптивные модификации [6]. Обработка информации с помощью линейного фильтра Калмана отличается простотой реализации, но невысокой точностью. Как правило, задачи обработки навигационной информации являются нелинейными, и поэтому для высокоточного решения задачи обработки навигационной информации целесообразно использовать алгоритмы нелинейной фильтрации, например нелинейный фильтр Калмана [7].

Способы реализации нелинейного фильтра Калмана. В случае, когда уравнение для вектора состояния имеет вид:

$$\mathbf{x}_k = \boldsymbol{\Phi}_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k, \tag{1}$$

и часть вектора состояния измеряется

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \tag{2}$$

где $\boldsymbol{\Phi}_k(\mathbf{x}_{k-1})$ — нелинейная матрица модели; $\mathbf{z}_k$ — вектор измерений; $\mathbf{H}_k$ — матрица измерений; $\mathbf{w}_k$ и $\mathbf{v}_k$ — дискретные аналоги гауссовского белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций $\mathbf{Q}_k$ и $\mathbf{R}_k$ соответственно,

уравнения фильтра Калмана будут иметь вид:

$$\begin{gathered}
\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k\text{-}1} + \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1})\left[\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_{k/k\text{-}1}\right];\\
\hat{\mathbf{x}}_{k/k\text{-}1} = \boldsymbol{\Phi}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1});\\
\mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1}) = \mathbf{P}_{k/k\text{-}1}\mathbf{H}_k^{\mathrm{T}}\left[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k/k\text{-}1}\mathbf{H}_k^{\mathrm{T}} + \mathbf{R}_k\right]^{-1};\\
\mathbf{P}_{k/k\text{-}1} = \frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1})}{\partial\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1}^{\mathrm{T}}}\mathbf{P}_{k\text{-}1}\left[\frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1})}{\partial\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1}^{\mathrm{T}}}\right]^{\mathrm{T}} + \mathbf{Q}_k;\\
\mathbf{P}_k = \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k\text{-}1})\mathbf{H}_k\right]\mathbf{P}_{k/k\text{-}1},
\end{gathered} \tag{3}$$

где $\mathbf{I}$ — единичная матрица; $\mathbf{P}_k$ — ковариационная матрица ошибок оценивания.

Такой подход применим лишь в случае унимодального характера апостериорной плотности. Когда апостериорная плотность многоэкстремальна, используется алгоритм, в котором апостериорная плотность представлена набором дельта-функций. В таком представлении общее количество узлов сетки, их расположение и значения весов стараются подобрать так, чтобы обеспечить наиболее точное совпадение характеристик действительной апостериорной.

Преимуществом коррекции в выходном сигнале с использованием нелинейного фильтра Калмана является простота, так как нет вмешательства в работу самой системы,

а коррекция происходит в выходном сигнале. Недостатком такой коррекции является возможность снижения точности из-за неадекватности модели исследуемого процесса и отсутствия достоверной априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов. Частично эти недостатки предотвращаются с помощью адаптивных модификаций алгоритмов оценивания, например модификации нелинейного фильтра Калмана [8].

Алгоритмы прогнозирования используются для компенсации погрешностей навигационной системы при исчезновении сигнала от внешнего датчика информации. На интервале времени работы навигационной системы с внешним датчиком запоминается измерительная выборка, включающая несколько последних измерений (измерения представляют собой смесь ошибок навигационной системы и внешнего датчика). При отключении внешнего датчика на основе последней измерительной выборки строится математическая модель, которая затем используется для прогнозирования погрешностей навигационной системы. Прогнозные значения используются для коррекции в выходном сигнале навигационной системы, так же как при коррекции с помощью фильтра Калмана.

В практических приложениях прогнозирование состояния маневрирующего объекта с использованием априорных математических моделей не представляется возможным. При функционировании динамического объекта в стохастических условиях объём априорной информации о нём, как правило, минимален. Поэтому целесообразно использовать для экстраполяции подход самоорганизации (ПСО) и генетический алгоритм.

ПСО [9] основывается на гипотезе селекции моделей и позволяет построить математическую модель без априорного указания закономерностей исследуемого объекта. Первый уровень алгоритма состоит в идентификации базисных функций по заданному критерию. На следующих уровнях строится комбинация моделей предыдущего уровня, прошедших пороговый самоотбор по ансамблю критериев.

В схемах коррекции навигационных систем можно применять алгоритм самоорганизации с резервированием трендов [10], позволяющий осуществлять непрерывную коррекцию ИНС в выходном сигнале (рис. 3).

Генетический алгоритм (ГА) — универсальный и многоцелевой метод прогнозирования, основанный на биологических принципах размножения, селекции и естественного отбора. Впервые алгоритм был предложен Дж. Холландом в Мичиганском университете в 1975 г. и получил название «репродуктивный план Холланда», являясь основой практически всех вариантов генетических алгоритмов.

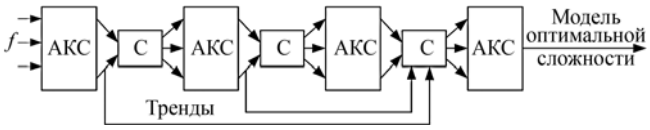

Рис. 3. Функциональная схема алгоритма самоорганизации с резервированием трендов:
f — базисные функции; АКС — ансамбль критериев селекции; *С* — способ скрещивания моделей

Обобщённая схема генетического алгоритма:

отбор особей и создание первоначальной популяции;

образование пар из отобранных особей;

скрещивание — создание новых особей из родительских пар;

мутация получившихся особей;

позиционирование новых особей в популяции.

Структурная схема классического генетического алгоритма представлена на рис. 4.

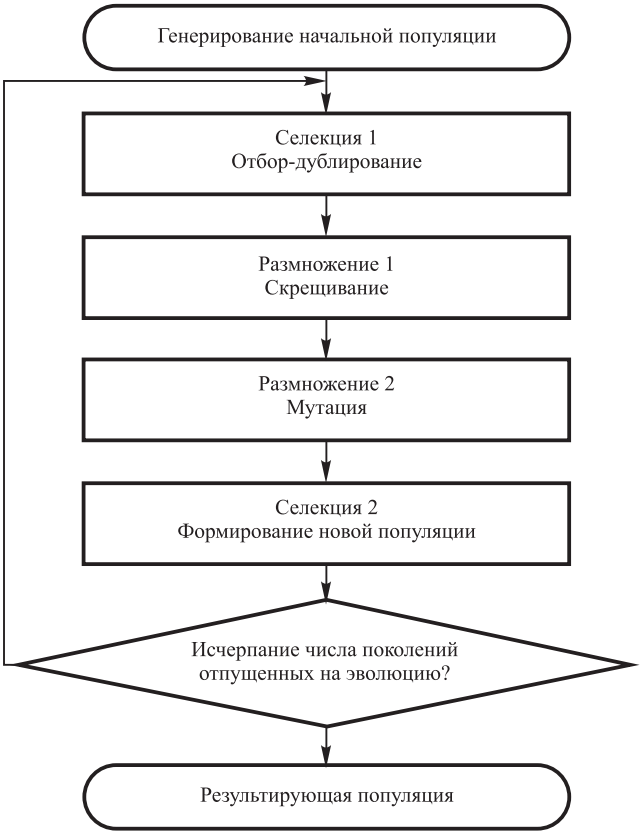

Рис. 4. Структурная схема классического генетическоо алгоритма

Применение ГА позволяет получить более высокую точность, но приводит к увеличению вычислительных затрат. ГА оперируют с популяцией оценок потенциальных решений (индивидуумов), используя принцип «выживает наиболее приспособленный». На каждом шаге алгоритма образуется новое множество приближений, создаваемое в процессе отбора индивидуумов согласно их уровню пригодности.

Моделирование по данным лабораторного эксперимента. При проверке работоспособности предложенных методов оценивания и прогнозирования принимается модель ошибок ИНС. Задача оценки и прогноза точности построения моделей измерительных систем, в частности ИНС, является важной и актуальной. Если полученные модели ошибок ИНС обладают достаточной точностью, то они могут быть использованы для коррекции навигационной информации.

В настоящее время все более широкое распространение имеют бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на базе микромеханических чувствительных элементов. Их ключевые особенности: малые габариты и масса, малое энергопотребление, низкая цена и низкая точность. Для улучшения точностных характеристик ИНС данные системы интегрируются со спутниковыми системами навигации (GPS или ГЛОНАСС), бароальтиметрами, магнитометрами и т.п. Интегрированная малогабаритная БИНС

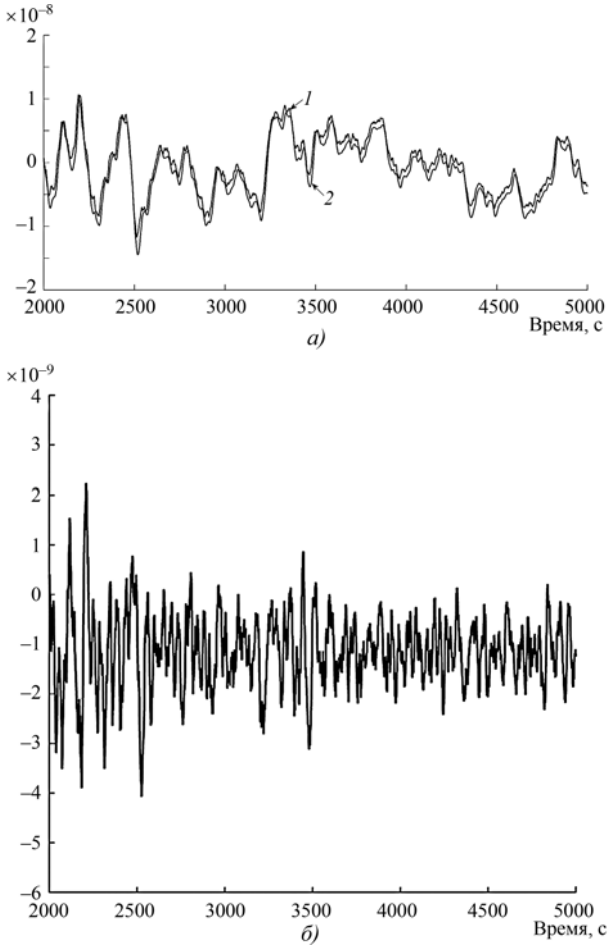

Рис. 5. Оценки углов отклонения ГСП реальной системы, полученные с помощью классического нелинейного фильтра Калмана:
а — оценки углов отклонения ГСП реальной системы; *б* — ошибки оценивания углов отклонения ГСП; *1* — углы отклонения ГСП реальной системы; *2* — оценки углов отклонения ГСП, полученные с помощью классического нелинейного фильтра Калмана

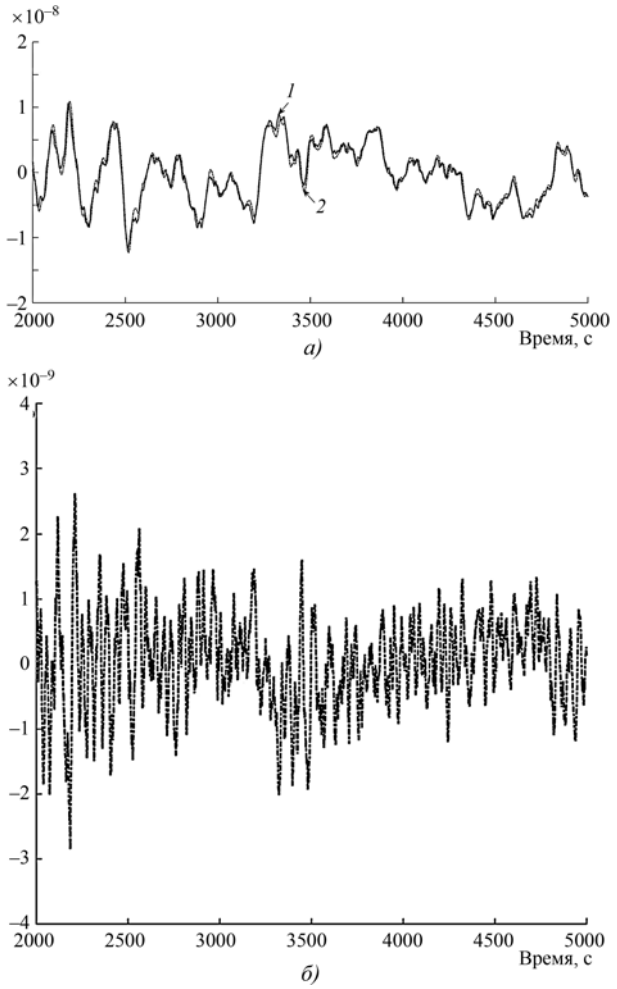

Рис. 6. Оценки углов отклонения ГСП реальной системы, полученные посредством модифицированного нелинейного фильтра Калмана с помощью подхода самоорганизации:
а — оценки углов отклонения ГСП реальной системы; *б* — ошибки оценивания углов отклонения ГСП; *1* — углы отклонения ГСП реальной системы; *2* — оценки углов отклонения ГСП, полученные посредством модифицированного нелинейного фильтра Калмана с помощью подхода самоорганизации

«Компанав-2» относится к вышеуказанному типу систем.

Работоспособность и точность предложенных алгоритмов оценивания проверены полунатурным моделированием с реальной ИНС «Компанав-2», установленной на неподвижном основании. Выходные сигналы ИНС являются ошибками в определении скорости и использованы в качестве вектора измерений. Моделирование по данным лабораторного эксперимента проводилось с использованием классического нелинейного фильтра Калмана и модифицированного фильтра Калмана. Результаты моделирования представлены на рис. 5—7.

Также для проверки работоспособности и точности предложенных методов прогнозирования проводилось полунатурное моделирование по данным лабораторного эксперимента с использованием подхода самоорганизации и генетического алгоритма. ИНС установлена на неподвижном основании. Полученные сигналы ИНС являются ошибками в определении скорости и использованы в качестве измерений. Результаты моделирования представлены на рис. 8, 9.

Выводы. Задача оценивания нелинейной модели в стохастических условиях теоретически может быть решена с помощью нелинейного фильтра Калмана. В практических приложениях априорные модели исследуемых процессов с течением времени часто становятся неадекватными, что снижает точность оцени-

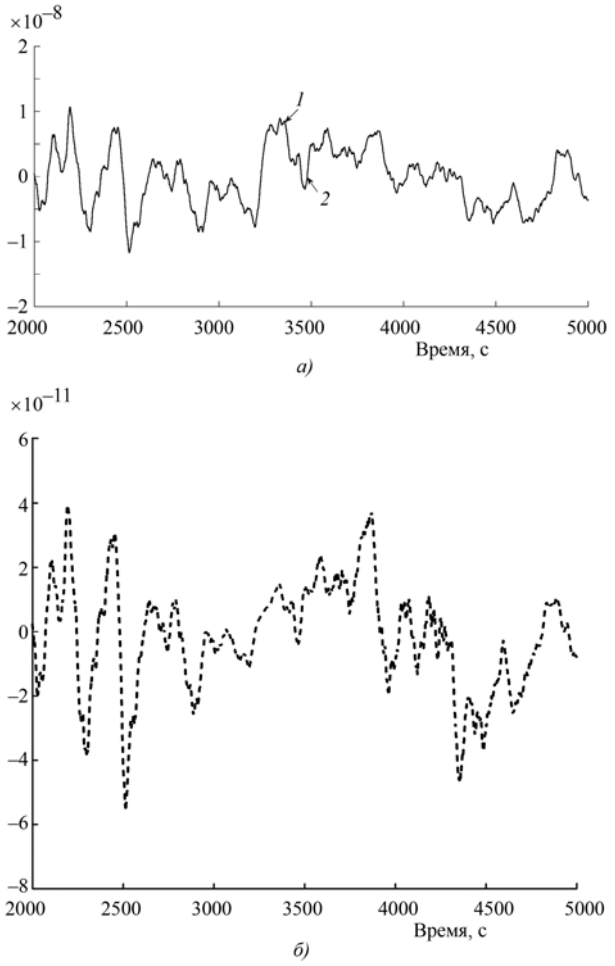

Рис. 7. Оценки углов отклонения ГСП реальной системы, полученные посредством модифицированного нелинейного фильтра Калмана с помощью генетического алгоритма:

а — оценки углов отклонения ГСП реальной системы; *б* — ошибки оценивания углов отклонения ГСП; *1* — углы отклонения ГСП реальной системы; *2* — оценки углов отклонения ГСП, полученные посредством модифицированного нелинейного фильтра Калмана с помощью генетического алгоритма

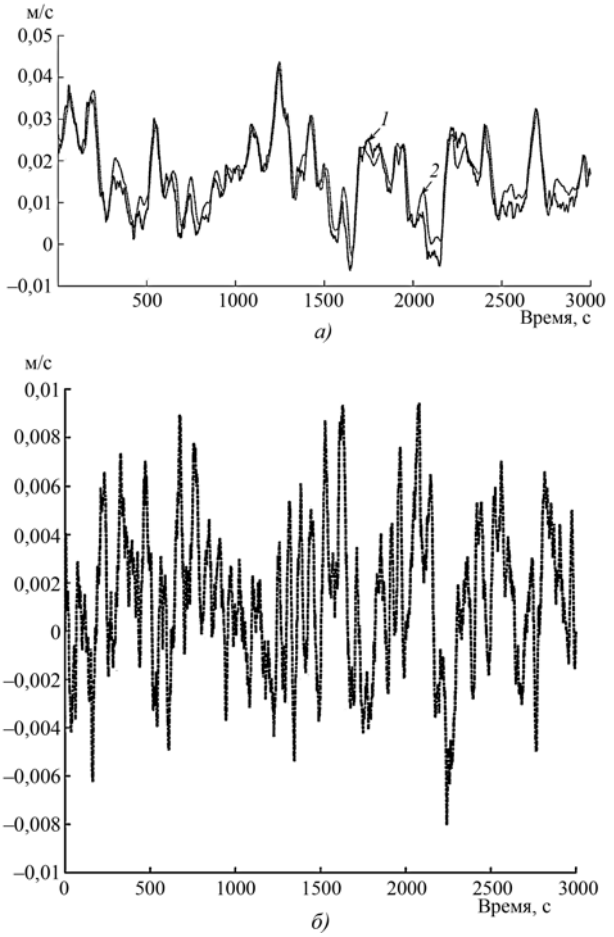

Рис. 8. Прогнозы ошибок ИНС в определении скорости, полученные на основании подхода самоорганизации:

а — прогноз ошибки в определении скорости, полученные в процессе лабораторного эксперимента; *б* — ошибки прогноза погрешностей ИНС в определении скорости, полученные с помощью подхода самоорганизации; *1* — ошибки в определении скорости, полученные в процессе лабораторного эксперимента; *2* — прогнозы ошибок ИНС в определении скорости, полученные с помощью подхода самоорганизации

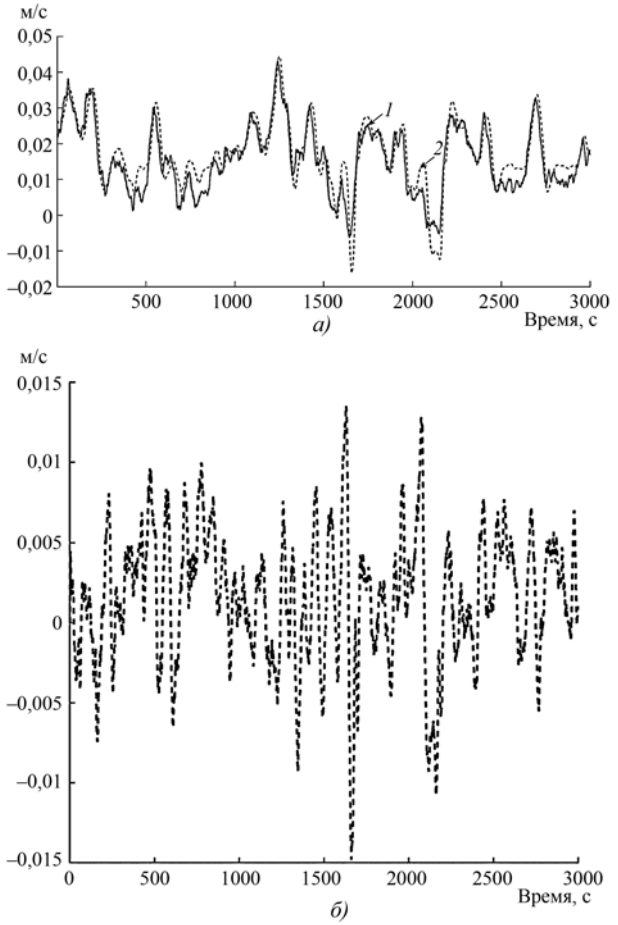

Рис. 9. Прогнозы ошибок ИНС в определении скорости, полученные на основании генетического алгоритма:
а — прогноз ошибок в определении скорости, полученные в процессе лабораторного эксперимента; *б* — ошибки прогноза погрешностей ИНС в определении скорости, полученные с помощью генетического алгоритма; *1* — ошибки в определении скорости, полученные в процессе лабораторного эксперимента; *2* — прогнозы ошибок ИНС в определении скорости, полученные с помощью генетического алгоритма

вания, а иногда приводит к расходимости процесса оценивания. Представлены адаптивные модификации нелинейного фильтра Калмана, которые заключаются в применении подхода самоорганизации и генетического алгоритма для построения нелинейной модели погрешностей ИНС. Работоспособность разработанных алгоритмов проверена методом полунатурного моделирования с реальной ИНС. Результаты моделирования показали эффективность разработанных модификаций нелинейного фильтра Калмана.

Коррекция навигационных систем в полёте при отключении внешнего датчика информации предусматривает реализацию алгоритма построения прогнозирующих моделей, в качестве которого использованы алгоритм самоорганизации с резервированием трендов и генетический алгоритм. Применение редуцированного алгоритма самоорганизации и генетического алгоритма даёт возможность сформировать математические модели в полёте, использование которых в навигационном комплексе для прогнозирования погрешностей ИНС позволяет эффективно осуществлять коррекцию навигационной информации.

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В.** Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы. 2010. № 3. С. 68—74.

2. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Алгоритмические способы коррекции автономных инерциальных навигационных систем. Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах». СПб.: ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 637—641.

3. **Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.** Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: Изд. МГУ, 1982. 173 с.

4. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. Информатика и системы управления № 5. 2012. С. 216—223.

5. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кэ Фан, Ким Чжэсу.** Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и современные технологии. № 2, 2013. С. 30—34.

6. **Шэнь Кай.** Разработка алгоритмов оценивания для коррекции навигационных систем. Тр. первого междун. симпозиума «Современные аспекты фундаментальных наук». М.: ИИУ МГОУ, 2013. С. 247—251.

7. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай, Лю Жунчжун.** Некоторые способы повышения точности алгоритмов оценивания погрешностей навигационных систем // Труды ФГУП «НПЦАП», Системы и приборы управления. 2014. № 3. С. 68—75.

8. **Neusypin K.A., Shen Kai, Liu Rong-zhong.** Modification of nonlinear Kalman filter using self-organizing approaches and genetic algorithms // International Journal of Information Engineering, Dec. 2013. Vol. 3, Iss. 4. P. 129—136.

9. **Ivakhnenko A.G., Koppa Yu.V., Min W.S.** Polynomial and logical theory of dynamic systems (pt. 1) // Sov. Automat. Contr., Vol. 3, 1970. № 3. P. 1—13.

10. **Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Shen Kai** et al. Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2014. № 5. P. 602—607.

11. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—11.

УДК 517.925:519.71

Тань Лиго, **А. В. Фомичев**, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Лю Ян, канд. техн. наук, доц.
(Харбинский политехнический университет, КНР)

a.v.fomichev@bmstu.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЁТА МАЛОГАБАРИТНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Рассмотрен новый подход к планированию маршрута полёта беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в реальном режиме времени, который построен на основе метода управления с прогнозирующими моделями, введения логических и непрерывных переменных, описывающих ограничения при облёте препятствий. Данный алгоритм особенно пригоден для применения при малом объёме информации об окружающей среде. Результаты моделирования показали, что с помощью предложенного подхода задача управления движением БПЛА в реальном режиме времени с облётом препятствий может быть успешно решена.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; плавное искривление траектории; планирование маршрута полёта; управление с прогнозирующими моделями; частично-целочисленное линейное программирование.

A new approach to planning the route of flight of the unmanned aerial vehicle (UAV) in real time is considered. This approach is based on the method of model predictive control, the introduction of logical and continuous variables describing the limitations of pass around obstacles. This algorithm is particularly suitable for use in a small amount of information about the environment. The simulation results show that using the proposed approach the problem of motion control UAV in real time with a flyby of obstacles can be successfully solved.

Key words: unmanned aerial vehicle; smooth curvature of the trajectory; planning the route of flight; model predictive control; mixed integer linear programming.

Введение. Схема автономного полёта БПЛА включает в себя три основных этапа: планирование полётного задания, планирование маршрута полёта и автономный полёт с помощью системы управления. Под планированием маршрута полёта понимается поиск оптимального маршрута полёта от его известного начального положения до известного конечного положения с учётом динамических характеристик БПЛА и решения задачи облёта препятствий. Маршрут полёта в реальном режиме времени рассчитывается с учётом минимизации определённого показателя (время полёта, затрачиваемое топливо и т. д.). Для того, чтобы решить данную задачу предлагается подход, суть которого заключается в следующем: необходимо разработать линеаризованную динамическую модель БПЛА; использовать в качестве основного компонента, минимизирующего целевую функцию, время полёта между соседними опорными точками, в которых изменяется маршрут полёта; применить частично-целочисленное линейное программирование (ЧЦЛП) [1] для введения линейных ограничений со смешанными формами, состоящих из логических и непрерывных переменных для описания ограничений при облёте препятствий; разработать алгоритмы управления с прогнозирующими моделями (УПМ) для вычисления оптимального маршрута полёта БПЛА.

В соответствии с теорией УПМ [1], которая используется в данной работе, в каждый дискретный момент времени для исследуемой динамической модели системы прогнозируется изменение её состояний в будущий момент времени. На основе результатов прогнозирования формируется задача расчёта оптимального маршрута полёта, в результате решения которой в реальном режиме времени получается последовательность оптимальных управлений. В текущий момент времени в системе управления используется только первый управляющий сигнал из данной последовательности и не используются остальные сигналы. В следующий текущий момент времени повторяется данный цикл оптимизации. И так процесс оптимизации выполняется в течение

всего времени полёта. В результате решения данной задачи получается ряд возможных опорных точек полёта, по очереди соединив которые, можно определить полную траекторию полёта БПЛА. В дальнейшем необходимо в реальном режиме времени сгладить полученную траекторию, чтобы рассчитать допустимую пространственную (трёхмерную) траекторию с учётом заданных динамических характеристик БПЛА. В настоящее время известны и используются следующие основные методы сглаживания траектории: алгоритм последовательного соединения участков в виде радиусов, алгоритм сглаживания рельефа, генетический алгоритм, B-сплайновый алгоритм и т. п. Поскольку каждый из этих алгоритмов имеет свои особенности, например, в виде существующей разницы в степени сложности вычислений или их точности, то область применения алгоритмов может существенно отличаться. На основе анализа и сравнения перечисленных алгоритмов, чтобы осуществить сглаживание запланированного маршрута полёта БПЛА, использован алгоритм последовательного соединения участков в виде радиусов.

В настоящее время метод УПМ широко применяется не только в системах управления промышленными процессами, но и используется в системах управления летательными аппаратами [2]. В процессе полёта БПЛА с течением времени его маршрут от начального состояния до целевого постепенно рассчитывается на основе метода УПМ. Причём каждый участок маршрута полёта получается в результате решения задачи оптимизации в ограниченной временной области. Таким образом, в большей степени сокращается время вычислений.

Планирование маршрута БПЛА должно соответствовать требованиям быстродействия вычислений в процессе полёта. Использование на борту БПЛА современных компьютеров с повышенной частотой процессора, а также соответствующего программного обеспечения, позволяет снизить влияние времени вычислений на решение общей задачи. Ниже приведены результаты моделирования, которые показывают, что для решения задачи планирования маршрута полёта БПЛА в сложных городских условиях метод УПМ позволяет эффективно и в реальном режиме времени вычислить оптимальный маршрут полёта.

Описание динамических свойств БПЛА. В качестве примера рассмотрим задачу выбора оптимального маршрута полёта БПЛА типа «W-50» от начальной до целевой точки за минимальное время с учётом облёта препятствий.

Модель движения БПЛА рассматривается как движение материальной точки с ограничениями, накладываемыми на скорость и ускорение движения, а также на изменение ускорения. Постановка задачи планирования траектории с использованием ЧЦЛП предполагает, что динамика БПЛА аппроксимируется линейной дискретной моделью в пространстве состояний и имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix}\mathbf{p}\\ \mathbf{v}\end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix}2\,\mathbf{I}_3 & \Delta t\,\mathbf{I}_3\\ \mathbf{O}_3 & 2\,\mathbf{I}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{p}\\ \mathbf{v}\end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix}\mathbf{I}_3 & \Delta t\,\mathbf{I}_3\\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{p}\\ \mathbf{v}\end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix}\frac{1}{2}(\Delta t)^2\,\mathbf{I}_3\\ \Delta t\,\mathbf{I}_3\end{bmatrix}\Delta\mathbf{a}_i, \quad (1)$$

где $\mathbf{I}_3$ — 3 × 3 единичная матрица; $\mathbf{O}_3$ — 3 × 3 нулевая матрица; Δt — период выборки; i — некоторый текущий момент времени; $\mathbf{p}_i = [x_i\ y_i\ z_i]^T$ — вектор местоположения БПЛА; $\mathbf{v}_i = \left[v_{x_i}\ v_{y_i}\ v_{z_i}\right]^T$ — вектор скорости; $\mathbf{a}_i = \left[a_{x_i}\ a_{y_i}\ a_{z_i}\right]^T$ — вектор ускорения; $\Delta\mathbf{a}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{i-1}$ — вектор изменения ускорения; $\mathbf{s}_i = [\mathbf{p}_i\ \mathbf{v}_i]^T \in R^6$ — вектор состояния; $\mathbf{u}_i := \mathbf{a}_i \in R^3$ — вектор входа (управления).

Для упрощения записи формулы (1), введём следующие обозначения:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}2\,\mathbf{I}_3 & \Delta t\,\mathbf{I}_3\\ \mathbf{O}_3 & 2\,\mathbf{I}_3\end{bmatrix},\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix}\mathbf{I}_3 & \Delta t\,\mathbf{I}_3\\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3\end{bmatrix}$$

$$\text{и}\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix}\frac{1}{2}(\Delta t)^2\,\mathbf{I}_3\\ \Delta t\,\mathbf{I}_3\end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение (1) преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{s}_{i+1} = \mathbf{A}\mathbf{s}_i - \mathbf{B}\mathbf{s}_{i-1} + \mathbf{C}\Delta\mathbf{u}_i.$$

Ограничение на динамические свойства. Скорость полёта $\mathbf{v}$, ускорение $\mathbf{a}$ и изменение ускорения $\Delta\mathbf{a}$ имеют определённые ограничения. В процессе полёта БПЛА общее пространственное движение удобно разделить на продольное и боковое движение, причём продольное движение можно рассматривать независимо от бокового [3]. Будем полагать, что ограничения на скорость $\mathbf{v}$, ускорение $\mathbf{a}$ и

изменение ускорения $\Delta\mathbf{a}$ в плоскости X—Y, соответственно, имеют вид:

$$\begin{cases} v_{\min} \leqslant \left\| \left[\dot{x}_i \;\; \dot{y}_i\right]^T \right\|_2 \leqslant v_{\max}, & i = \overline{0, N}\,; \\ \left\| \left[\ddot{x}_i \;\; \ddot{y}_i\right]^T \right\|_2 \leqslant a_{\max}, & i = \overline{0, N-1}\,; \\ \left\| \left[\ddot{x}_i \;\; \ddot{y}_i\right]^T - \left[\ddot{x}_{i-1} \;\; \ddot{y}_{i-1}\right]^T \right\|_2 \leqslant \Delta a_{\max}, & i = \overline{1, N-1}\,, \end{cases} \quad (2)$$

где N — количество общих шагов планирования маршрута; $\|\cdot\|_2$ — Евклидова норма.

Поскольку ограничения, описанные неравенствами (2), являются нелинейными, их необходимо преобразовать к виду линейного неравенства, чтобы затем использовать в ЧЦЛП. В работе [1] описано, что каждое из ограничений можно приближённо заменить набором линейных неравенств, определяющих область вписанного многоугольника, в свою очередь, ограниченного определённой окружностью. Соответственно, многоугольник будет определяться набором Q линейных неравенств для $\forall i$.

Используемые вписанные многоугольники с Q сторонами можно приближённо описать в виде следующих линейных неравенств:

$$\begin{cases} v_{\min} \leqslant \dot{x}_i \sin\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) + \dot{y}_i \cos\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) \leqslant v_{\max}, \\ q = \overline{1, Q}, \quad i = \overline{0, N}\,; \\ \ddot{x}_i \sin\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) + \ddot{y}_i \cos\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) \leqslant a_{\max}, \\ q = \overline{1, Q}, \quad i = \overline{0, N-1}\,; \\ \Delta\ddot{x}_i \sin\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) + \Delta\ddot{y}_i \cos\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) \leqslant \Delta a_{\max}, \\ q = \overline{1, Q}, \quad i = \overline{1, N-1}\,. \end{cases} \quad (3)$$

Следует обратить внимание на ограничение на минимальную скорость $v_{\min} \leqslant \left\| \left[\dot{x}_i \;\; \dot{y}_i\right]^T \right\|_2$. Очевидно, что данное ограничение является невыпуклым множеством, поэтому далее вводится логическая переменная c_q ($q = \overline{1, Q}$) и используется симплексный М-метод [4]. Таким образом, ограничение на минимальную скорость имеет вид:

$$\begin{cases} v_{\min} - \left(\dot{x}_i \sin\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) + \dot{y}_i \cos\left(\dfrac{2\pi q}{Q}\right) \right) \leqslant M c_q, \\ q = \overline{1, Q}, \quad i = \overline{0, N}; \\ \sum\limits_{q=1}^{Q} c_q \leqslant Q - 1. \end{cases} \quad (4)$$

Ограничения на скорость $\mathbf{v}$, ускорение $\mathbf{a}$ и изменение величины ускорения $\Delta\mathbf{a}$ в проекциях на направление оси z записываются в виде:

$$\begin{cases} \dot{z}_{\min} \leqslant \dot{z}_i \leqslant \dot{z}_{\max}, & i = \overline{0, N}\,; \\ \ddot{z}_{\min} \leqslant \ddot{z}_i \leqslant \ddot{z}_{\max}, & i = \overline{0, N-1}\,; \\ \Delta\ddot{z}_{\min} \leqslant \Delta\ddot{z}_i \leqslant \Delta\ddot{z}_{\max}, & i = \overline{1, N-1}\,. \end{cases} \quad (5)$$

Ограничения при обходе препятствий. Препятствие произвольной формы можно приблизительно представить в виде многогранника. Используя логические переменные "0" и "1", а также симплексный М-метод, ограничения при обходе препятствий можно выразить в виде линейных ограничений, включающих смешанные переменные, состоящие из логических и непрерывных переменных [2]. Для упрощения решения задачи планирования маршрута полёта предполагается, что препятствие представляет собой блочное здание в форме куба, а его математическое описание имеет вид:

$$\{(x, y, z) \in R^3 : x_{\min} \leqslant x \leqslant x_{\max}, \\ y_{\min} \leqslant y \leqslant y_{\max}, z_{\min} \leqslant z \leqslant z_{\max}\}. \quad (6)$$

Для i-го шага планирования маршрута ($i = \overline{1, N}$) ограничения при обходе препятствий имеют вид:

$$\begin{cases} x_i - x_{\min} \leqslant M b_{i1}; \\ y_i - y_{\min} \leqslant M b_{i2}; \\ z_i - z_{\min} \leqslant M b_{i3}; \\ -x_i + x_{\max} \leqslant M b_{i4}; \\ -y_i + y_{\max} \leqslant M b_{i5}; \\ -z_i + z_{\max} \leqslant M b_{i6}; \\ \sum\limits_{j=1}^{6} b_{ij} \leqslant 5; \\ b_{ij} \in (0, 1), \; j = \overline{1, 6}, \end{cases} \quad (7)$$

где M — достаточно большая по величине константа, причём её значение больше, чем доступное максимальное значение левой части первых шести неравенств формулы (7); b_{ij} — логическая переменная (0 или 1).

Из последних двух уравнений (7) можно установить, что по крайней мере одно из значений b_{ij} равняется 0. Таким образом, в первых шести уравнениях (7) хотя бы одно значение правой части равняется 0. Предполагается,

что $x_i - x_{\min} \leqslant 0$, т. е. $x_i \leqslant x_{\min}$. В этом случае БПЛА успешно уклоняется от столкновения с препятствием.

Математическое описание планирования маршрута полёта БПЛА. Исходя из уравнений (1), (3)—(5), (7), в k-й момент времени математическое описание задачи оптимизации маршрута полёта БПЛА имеет вид:

$$\min_{\mathbf{x}_k,\,\mathbf{u}_k} J = \sum_{i=0}^{T-1} a\left\|\mathbf{s}_{k+i|k} - \mathbf{s}_F\right\|_1 + \sum_{i=0}^{T-1} b\left\|\mathbf{u}_{k+i|k}\right\|_1 + \\ + \sum_{i=1}^{T-1} c\left\|\Delta\mathbf{u}_{k+i|k}\right\|_1 + d\left\|\mathbf{s}_{k+T|k} - \mathbf{s}_F\right\|_1; \quad (8)$$

$$\mathbf{s}_{k+0|k} = \mathbf{s}_{k|k-1}; \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{u}_{k+i+1|k} = \mathbf{u}_{k+i+1|k} - \mathbf{u}_{k+i|k}, \\ i = \overline{0, T-2}; \\ \mathbf{s}_{k+i+1|k} = \mathbf{A}\mathbf{s}_{k+i|k} - \mathbf{B}\mathbf{s}_{k+i-1|k} + \mathbf{C}\Delta\mathbf{u}_{k+i|k}, \\ i = \overline{1, T-1}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{s}_{k+i|k} \in S, & i = \overline{0, T}; \\ \mathbf{u}_{k+i|k} \in U, & i = \overline{0, T-1}; \\ \Delta\mathbf{u}_{k+i|k} \in \Delta U, & i = \overline{1, T-1}; \\ \mathbf{p}_{k+i|k} \notin O_k, & i = \overline{1, T}; \\ \mathbf{s}_{k+T|k} \in S_{k+T|k}, \end{cases} \quad (11)$$

где T — размер интервала времени для прогноза и управления; a, b, c и d — неотрицательные весовые коэффициенты.

Поясним смысл слагаемых, которые входят в целевую функцию (8). Первое и второе слагаемые учитывают влияние факта неприбытия в заданную точку и затраты топлива. Третье слагаемое учитывает влияние изменения ускорения, обеспечивающего устойчивый полёт, причём в процессе движения динамические свойства БПЛА не подвержены радикальным изменениям. Четвёртое слагаемое учитывает влияние конечного состояния. Первые три формулы (11) являются ограничениями на динамические свойства БПЛА (10). С учётом задержки вычислений по времени в момент времени $k - 1$ необходимо вычислить маршрут полёта для момента времени k. Уравнение (9) является начальным условием для формул (10).

В системе уравнений (11) первое уравнение описывает ограничение на состояние БПЛА, которое определяется по формуле (4) и первому уравнению из систем (3) и (5); второе определяет ограничение на управление, которое вычисляется по второму уравнению (3) и (5); третье учитывает ограничение на величину изменения ускорения, которое определяется по третьему уравнению (3) и (5); четвертое описывает ограничение при обходе препятствий, которое определяется по формуле (7); пятое задаёт ограничение на конечные состояния, которые будут подробно описаны ниже.

В целевой функции (8) символ $\|\cdot\|_1$ обозначает максимум нормы, которая является нелинейной. Однако с помощью дополнительной переменной её можно преобразовать в линейную форму, как описано в работе [1].

Ограничение на конечное состояние. Предположим, что конечное состояние относится к последнему состоянию во временной области планирования, т. е. $\mathbf{s}_{k+T|k}$. В конечном состоянии временной области планирования управляемая величина и изменение управляемой величины равны нулю.

В модель прогноза управления добавляется набор ограничений на конечные состояния, т. е. $\mathbf{s}_{k+T|k} \in S_{k+T|k}$, чтобы гарантировать условие устойчивости системы, которое играет важную роль.

Ограничение на конечное состояние имеет вид:

$$S_{k+T|k} = \\ = \left\{\mathbf{s}_{k+T|k} : \mathbf{u}_{k+T|k} = \mathbf{0}_{3\times1},\ \Delta\mathbf{u}_{k+T|k} = \mathbf{0}_{3\times1}\right\}. \quad (12)$$

Сглаживание траектории полёта. В уравнении динамики движения БПЛА рассматриваются в виде материальной точки. В реальном полёте конечные размеры БПЛА необходимо учитывать для того, чтобы успешно уклониться от столкновения с препятствием. В указанных выше ограничениях для обхода препятствий (7) в левую часть первых пяти соотношений необходимо добавить величину d в каждом направлении (где d — максимальный характерный размер БПЛА).

С другой стороны, запланированный маршрут полёта представляет собой набор дискретных точек, поэтому возможно рассмотреть две ситуации: с углом среза или с препятствием на пути перехода [1]. В данных ситуациях БПЛА сталкивается с препятствием. Поэтому, чтобы избежать столкновения, например, в ситуации с углом среза, в каждом направлении (кроме нисходящего направле-

ния оси z) размер препятствия должен быть увеличен на значение $v_{\max}\Delta t/2\sqrt{2}$.

Чтобы избежать столкновения в ситуации с препятствием на пути перехода, необходимо добавить соответствующее количество линейно-интерполяционных узлов. В этом случае переменная $\mathbf{p}_k$ в уравнениях, описывающих ограничения при обходе препятствий (11), заменяется выражением:

$$\mathbf{p}_{k-1} + \frac{l}{L}\left(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{k-1}\right), \quad l = \overline{1, L}, \qquad (13)$$

где L — количество точек интерполяции между двумя соседними точками маршрута полёта.

Когда между соседними участками пути существует определённый угол θ, как показано на рис. 1, то в это время БПЛА, движущийся по траектории, обязательно поворачивается. Поэтому в этом случае невозможно поддерживать режим его прямолинейного полёта. Алгоритм последовательного соединения радиусных сегментов траектории связан с обработкой сглаживанием для всех участков полёта. Кроме того, должно быть гарантировано касание между радиусным сегментом и двумя соседними сегментами пути так, чтобы обеспечивать гладкость траектории полёта. Причём точка касания должна расположиться на соседнем сегменте пути, как показано на рис. 1.

Таким образом, условие существования допустимого маршрута полёта требует, чтобы радиус кривизны r_i каждой точки касания (см. рис. 1) был не меньше минимального радиуса поворота БПЛА $R_{\min}$. Этот радиус с учётом максимальной нормальной перегрузки БПЛА вычисляется по формуле [5]:

$$R_{\min} = \frac{v_{\min}^2}{g\sqrt{n_{y\max}^2 - 1}}, \qquad (14)$$

где $v_{\min}$ — минимальная скорость полёта БПЛА; g — ускорение свободного падения; $n_{y\max}$ — максимальная нормальная перегрузка БПЛА.

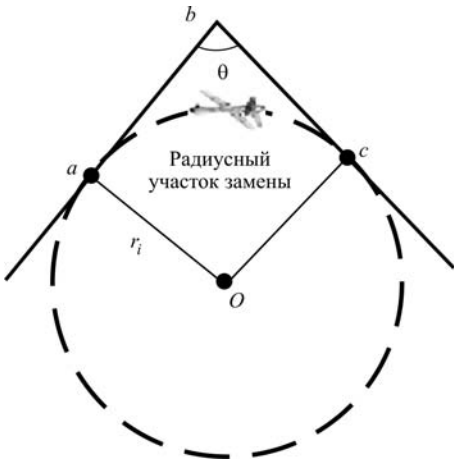

Рис. 1. Схема замены ломаной линии радиусным сегментом

Моделирование планирования маршрута полёта БПЛА с имитацией движения в горной местности. Для описания задачи ЧЦЛП в качестве языка программирования используется система программного обеспечения AMPL (A Mathematical Programming Language). Для решения задачи ЧЦЛП в качестве решателя используется пакет программного обеспечения CPLEX. С помощью функции MATLAB «fprintAmplParam» данные MATLAB, например скаляр, вектор или матрица, преобразуются к виду данных, используемых в программе AMPL, чтобы обрабатывать данные и визуализировать результаты вычислений. Время решения с помощью программного обеспечения CPLEX ограничивается 1 с, т. е. в каждый момент времени k время решения ЧЦЛП ограничивается не больше чем 1 с. Если время будет больше ограниченного, то программное обеспечение CPLEX даёт субоптимальное решение. Программа моделирования работает на компьютере с процессором Core i7 и оперативной памятью 4 Гб.

В процессе моделирования были использованы следующие параметры:

$v_{\max}$ = 65 м/с; $v_{\min}$ = 35 м/с; $v_{z\max}$ = 15 м/с;
$v_{z\min}$ = −15 м/с; $a_{\max}$ = 30 м/с^2;
$a_{z\max}$ = 10 м/с^2; $a_{z\min}$ = −10 м/с^2;
$\Delta a_{\max}$ = 15 м/с^2; $\Delta a_{z\max}$ = 5 м/с^2;
$\Delta a_{z\min}$ = −5 м/с^2.

Период выборки — Δt = 1 с, $M = 10^6$, количество сторон многоугольника Q = 24, минимальный радиус поворота 41,5 м, длина шага планирования T = 10, весовые коэффициенты a = 1, b = 0,01, c = 0,1, d = 1. С учётом размера препятствия число точек интерполяции L = 4.

В процессе моделирования предполагается, что маршрут полёта БПЛА из начальной точки в целевую должен проходить через несколько важных точек. Например, маршрут

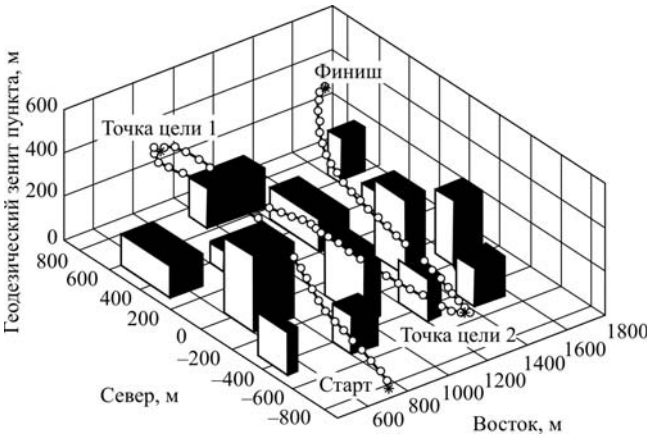

Рис. 2. Пространственный маршрут полёта

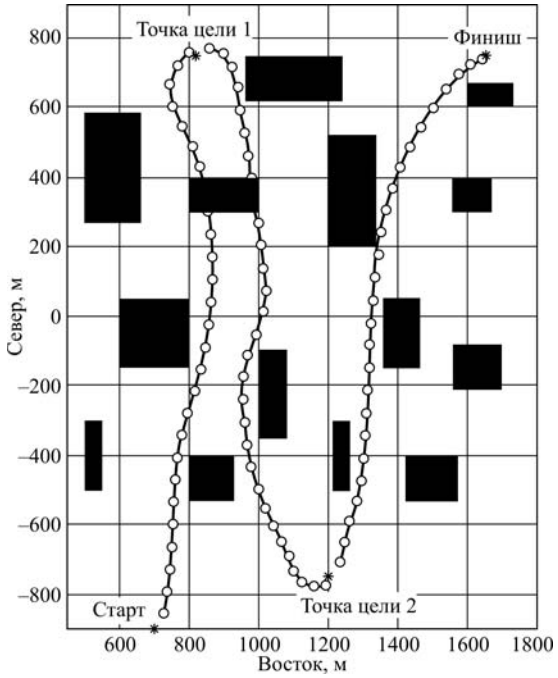

Рис. 3. Проекция маршрута полёта БПЛА на двухмерной плоскости

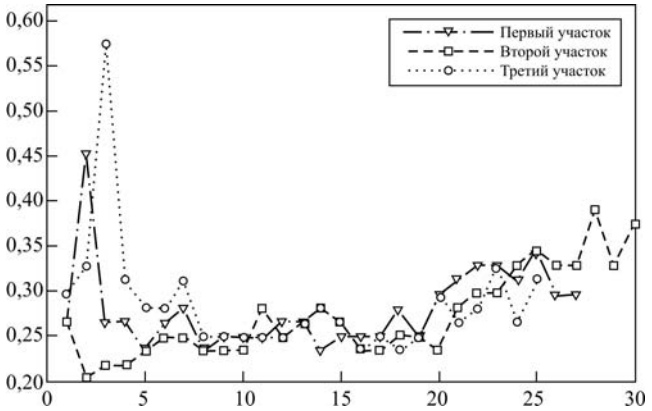

Рис. 4. Время решения для каждой точки каждого участка маршрута

полёта БПЛА из точки (700—900, 50) в целевую точку (1650, 750, 350) проходит через последовательные точки маршрута (820, 750, 350) и (1200—750, 150). Результаты моделирования показаны на рис. 2—4.

На рис. 2 и 3 показано, что в полёте БПЛА успешно избежал все имеющиеся на пути препятствия. Полученные результаты (см. рис. 4) подтвердили, что время решения для каждого участка маршрута полёта БПЛА меньше заданного времени решения (1 с). Кроме того, доказывается, что разработанный алгоритм планирования маршрута полёта подходит для случая планирования маршрута полёта в реальном времени.

Заключение. Таким образом, изучены существующие методы планирования маршрута полёта малогабаритных БПЛА по пространственной траектории в условиях городской среды с помощью УПМ. Анализ результатов моделирования показывает, что с помощью предложенного алгоритма планирования маршрута полёта возможно в реальном режиме времени и высокоэффективно вычислять оптимальный маршрут полёта с учётом маневренных свойств БПЛА, а также обрабатывать его сглаживанием. В процессе полёта из начальной точки в целевую БПЛА успешно избежал все препятствия, поэтому данный алгоритм особенно подходит для планирования маршрута полёта малогабаритных БПЛА по пространственной траектории в реальном режиме времни в городских условиях.

Библиографические ссылки

1. **Yoshiaki Kuwata.** Real-time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles using Receding Horizon Control: the example of the Massachusetts Institute of Technology: Dissertation Ph. D. watered. Sciences, 2003. 151 p.

2. **Richards A.G., How J.P.** Mixed-integer programming for control // Proceedings of the American Control Conference. 2005. Vol. 4. P. 2676—2683.

3. **Мушенко А.С.** Синергетический синтез законов взаимосвязанного управления продольным движением летательных аппаратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 61. № 6. С 222—226.

4. **Плотников А.Д.** Математическое программирование: экспресс-курс. М.: Новое знание, 2007. 171 с.

5. **Ren Bo, Yu Lei, Han Lixun.** On path planning for UAVs based on adaptive ant system algorithm // Electronics Optics and Control. 2007. Vol. 6. N. 14. P. 36—39.

УДК 681.5

М. Г. Зотов, д-р техн. наук, проф.
(Московский институт электроники и математики
национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»)
zotova35@mail.ru

АЛГОРИТМ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ НА ГРАНИ УСТОЙЧИВОСТИ

Показано, что если передаточная функция объекта управления имеет нули или полюсы на мнимой оси, т. е. объект находится на грани устойчивости, то характеристический полином оптимальной системы также будет иметь корни на мнимой оси, что, естественно, неприемлемо. Приведён алгоритм, позволяющий решить эту проблему.

Ключевые слова: робастная устойчивость; робастный регулятор; конструирование систем управления.

When the transfer function of the control object has zeros or poles on the imaginary axis, i. e. the object is on the verge of stability, the characteristic polynomial optimal system will also have roots on the imaginary axis, which is naturally unacceptable. The algorithm allows to solve this problem is reduced.

Key words: Robust stability; robust controller; control system design.

Введение. Рассмотрим существующие методики конструирования оптимальных систем в пространстве вход—выход на примере управляющего устройства с одним звеном коррекции $W_1(s) = V_1(s)/G_1(s)$ [1]. Такая система приведена на рис. 1, *а*. Отметим, что на рис. 1 $W_0(s) = Q_0(s)/P_0(s)$ — передаточная функция математической модели реального объекта управления. Передаточная функция реального объекта $W_0^*(s) = Q_0^*(s)/P_0^*(s)$. Для неё имеет место соотношение

$$W_0(s) \approx W_0^*(s), \deg Q_0(s) = \deg Q_0^*(s), \quad \deg P_0(s) = \deg P_0^*(s). \tag{1}$$

Оптимальное управляющее устройство конструируется для модели объекта с передаточной функцией $W_0(s)$, а функционировать оно должно на реальном объекте.

Согласно алгоритму, из условия оптимума критерия качества определяется оптимальное значение передаточной функции $\tilde{H}(s)$ системы относительно задающего воздействия $g_1(t)$ и выхода $y(t)$:

$$\tilde{H}(s) = \frac{\tilde{M}(s)}{\tilde{N}(s)} = \frac{W_1(s)W_0(s)}{1 + W_1(s)W_0(s)} = \frac{V_1(s)Q_0(s)}{G_1(s)P_0(s) + V_1(s)Q_0(s)}. \tag{2}$$

Алгоритм поиска построен так, что все корни полинома $\tilde{N}(s)$ всегда находятся в левой полуплоскости. Определяется значение передаточной функции звена коррекции

$$W_1(s) = \frac{V_1(s)}{G_1(s)} = \frac{\tilde{H}(s)}{(1 - \tilde{H}(s))W_0(s)} = \frac{\tilde{M}(s)}{\tilde{N}(s) - \tilde{M}(s)} \frac{P_0(s)}{Q_0(s)}. \tag{3}$$

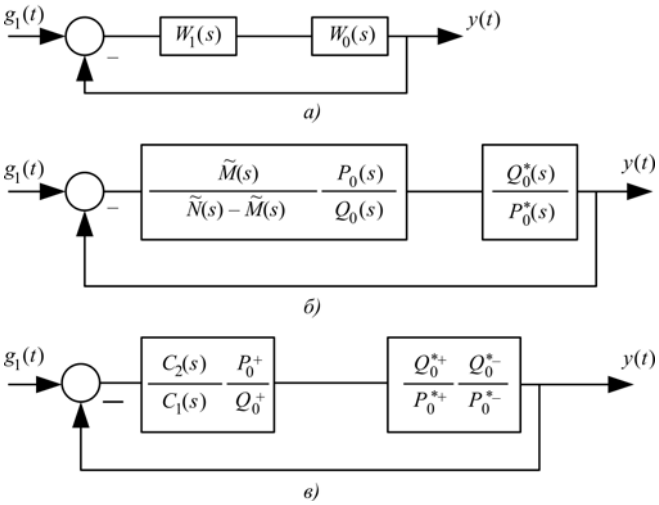

Рис. 1. Этапы конструирования передаточной функции регулятора (звена коррекции):
а — система управления со звеном коррекции в прямой цепи; *б* — система управления в составе реального объекта и звена коррекции; *в* — система управления с реальным объектом и сконструированным регулятором

На рис. 1, *б* приведена схема в составе реального объекта и спроектированного регулятора. Из схемы видно, что звено коррекции компенсирует передаточную функцию объекта управления, и если производится компенсация правых корней, то система будет неустойчивой, если корней, лежащих на мнимой оси, — то на грани устойчивости. Заметим, что речь идёт не о тождественных, а о близких корнях. Итак, спроектированная оптимальная система не будет робастной относительно свойства устойчивости, если в передаточной функции объекта имеются лежащие на мнимой оси и справа от неё нули и полюсы. Решение задачи коррекции алгоритма расчёта, когда корни полиномов $Q_0(s)$ и $P_0(s)$ находятся справа от мнимой оси, было рассмотрено в работе [1]. Случай, когда корни полиномов находятся на мнимой оси, в работе [1] не рассматривался. Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи. Внести коррекцию в методику конструирования передаточной функции регулятора с тем, чтобы исключить возможность компенсации передаточной функцией регулятора находящихся на мнимой оси нулей и полюсов передаточной функции объекта управления.

Решение задачи. Передаточные функции реального объекта и его модели имеют вид:

$$W_0^*(s) = Q_0^{*+}Q_0^{*-} / P_0^{*+}P_0^{*-},$$
$$W_0(s) = Q_0^{+}Q_0^{-} / P_0^{+}P_0^{-}.$$

Полиномы $Q_0^{*+}(s)$, $Q_0^{+}(s)$, $P_0^{*+}(s)$, $P_0^{+}(s)$ и $Q_0^{*-}(s)$, $Q_0^{-}(s)$, $P_0^{*-}(s)$, $P_0^{-}(s)$ имеют соответственно корни слева от мнимой оси, другая группа — на мнимой оси и справа от неё. На полиномы, входящие в искомую передаточную функцию $\tilde{H}(s)$, наложим ограничения:

$$\begin{aligned} &\tilde{N}(s) - \tilde{M}(s) = C_1(s)P_0^-(s), \\ &\tilde{M}(s) = C_2(s)Q_0^-(s). \end{aligned} \tag{4}$$

При этом ограничение на расположение корней полинома $\tilde{N}(s)$, а именно в левой полуплоскости, остаётся в силе. С учётом этих ограничений передаточная функция (3) звена коррекции запишется в виде:

$$W_1(s) = \frac{V_1(s)}{G_1(s)} = \frac{C_2(s)}{C_1(s)}\frac{P_0^+}{Q_0^+}. \tag{5}$$

На рис. 1, *в* приведена схема с реальным объектом и звеном коррекции с передаточной функцией (5). Как видно, в ней передаточная функция звена коррекции уже не компенсирует корней передаточной функции реального объекта на мнимой оси и лежащих справа от неё. Заметим, что из (4) следует полином

$$C_1(s)P_0^-(s) + C_2(s)Q_0^-(s) = \tilde{N}(s) \tag{6}$$

с корнями из левой полуплоскости. Примем, что это свойство сохраняется и для передаточной функции реального объекта.

Примем, что в (4) корни полиномов $P_0^-(s)$ и $Q_0^-(s)$ лежат только на мнимой оси. Рассмотрим выражения:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\left(1-\tilde{H}(s)\right)\frac{1}{P_0^-(s)}\right|^2 ds = \\ &= \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\frac{\tilde{N}(s)-\tilde{M}(s)}{\tilde{N}(s)}\frac{1}{P_0^-(s)}\right|^2 ds, \\ &\frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\tilde{H}(s)\frac{1}{Q_0^-(s)}\right|^2 ds = \\ &= \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\frac{\tilde{M}(s)}{\tilde{N}(s)}\frac{1}{Q_0^-(s)}\right|^2 ds. \end{aligned} \tag{7}$$

Известно [1, 2], что интегралы (7) расходятся, если степень числителя выражения под знаком модуля выше или равна степени знаменателя, или корни знаменателя находятся на мнимой оси.

Если с некоторым весом ввести эти выражения в функционал, оценивающий качество системы, а его для решения задачи нужно минимизировать, то это приведёт к выполнению ограничений (4). Поясним примером.

Пример. Модель объекта задана передаточной функцией $W_0(s) = Q_0(s)/P_0(s) = 1/s$. Желаемая передаточная функция относительно задающего воздействия $P_1(s) = 4/(s + 3)$. Искомое звено коррекции, как показано на рис. 1, *а*, расположено в прямой цепи. Из условия минимума близости передаточной функции системы $\tilde{H}(s)$ относительно задающего воздействия $g_1(t)$ к $P_1(s) = 4/(s + 3)$ определить значение $W_1(s)$ передаточной функции звена коррекции.

Из условия задачи запишем критерий, оценивающий близость передаточной функции системы $\tilde{H}(s)$ к $P_1(s)$:

$$I_1 = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\left(\frac{4}{s+3} - \tilde{H}(s)\right)\right|^2 ds. \tag{8}$$

Из (8) следует, что подходящим решением может быть $\tilde{H}(s) = P_1(s)$. Передаточная функция звена коррекции имеет вид:

$$W_1(s) = \frac{\tilde{H}}{W_0(s)(1-\tilde{H}(s))} = \\ = \frac{P_0(s)M(s)}{Q_0(s)(N(s)-M(s))} = \frac{4s}{s-1}.$$

Запишем характеристический полином системы с реальным объектом, имеющим передаточную функцию $W_0^*(s) = Q_0^*(s)/P_0^*(s) = 1/(s \pm \varepsilon)$, где ε малое число:

$$T^*(s) = P_0^*(s)G_1(s) + Q_0^*(s)V_1(s) = \\ = s^2 + (3 \pm \varepsilon)s \mp \varepsilon.$$

Из характеристического полинома следует, что сконструированная система свойством грубости относительно устойчивости не обладает.

Для устранения этого недостатка в исходный функционал с некоторым весом γ_1^* введём ограничение из (7):

$$I_2 = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\left(\frac{4}{s+3} - \tilde{H}(s)\right)\right|^2 ds + \\ +\gamma_1^*\frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\left(1-\tilde{H}(s)\right)\frac{1}{s}\right|^2 ds. \quad (9)$$

Минимальное значение I_2 достигается, если искомая функция $\tilde{H}(s)$ удовлетворяет уравнению Винера—Хопфа:

$$\left(1+\gamma_1^*\frac{1}{s(-s)}\right)\tilde{H}(s) - \left(\frac{4}{s+3} + \gamma_1^*\frac{1}{s(-s)}\right) = \Gamma(s).$$

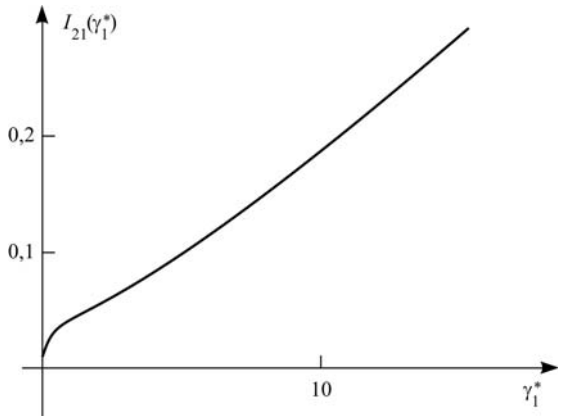

Рис. 2. График зависимости составляющей критерия качества от коэффициента γ_1^*

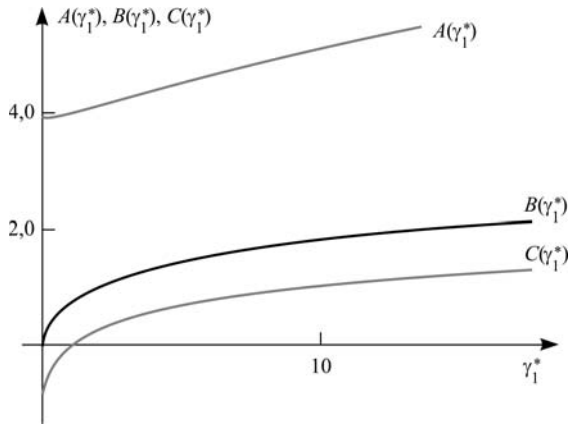

Рис. 3. График зависимости параметров звена коррекции от коэффициента γ_1^*

Решая его, найдём

$$\tilde{H}(s,\gamma_1^*) = \frac{\tilde{M}(s,\gamma_1^*)}{\tilde{N}(s,\gamma_1^*)} = \\ = \frac{\left(\gamma_1^* + 3\sqrt{\gamma_1^*} + 12\right)s + 3\sqrt{\gamma_1^*}\left(\sqrt{\gamma_1^*}+3\right)}{\left(\sqrt{\gamma_1^*}+3\right)(s+3)\left(s+\sqrt{\gamma_1^*}\right)}.$$

$$\tilde{H}(s,0) = \frac{4}{s+3}$$

На рис. 2 приведена зависимость величины первой составляющей в выражении (9)

$$I_{21}(\gamma_1^*) = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\left|\left(\frac{4}{s+3} - \frac{\left(\gamma_1^* + 3\sqrt{\gamma_1^*} + 12\right)s + 3\sqrt{\gamma_1^*}\left(\sqrt{\gamma_1^*}+3\right)}{\left(\sqrt{\gamma_1^*}+3\right)(s+3)\left(s+\sqrt{\gamma_1^*}\right)}\right)\right|^2 ds = \frac{\sqrt{\gamma_1^*}\left(3\gamma_1^{*3/2} - 5\gamma_1^* + 9\sqrt{\gamma_1^*} + 9\right)}{6\left(\sqrt{\gamma_1^*}+3\right)^3},$$

$$\underbrace{\lim I_{21}(\gamma_1^*)}_{\gamma_1^*\to\infty} = \infty,\ I_{21}(0) = 0.$$

Интеграл раскрыт с использованием соотношений из теории вычетов [2].

Ещё раз отметим, что при $\gamma_1^* = 0$ сконструированная система свойством устойчивости не обладает, хотя и является оптимальной. Найдём передаточную функцию регулятора:

$$W_1(s,\gamma_1^*) = \frac{\tilde{H}(s,\gamma_1^*)}{W_0(s)(1-\tilde{H}(s,\gamma_1^*))} =$$

$$= \frac{\left(\gamma_1^* + 3\sqrt{\gamma_1^*} + 12\right)s + 3\sqrt{\gamma_1^*}\left(\sqrt{\gamma_1^*} + 3\right)}{(\gamma_1^* + 3)s + 3(\gamma_1^* - 1)},$$

$$W_1(s,0) = \frac{4s}{s-1}.$$

Для анализа влияния весового коэффициента γ_1^* на параметры регулятора запишем передаточную функцию $W_1(s,\gamma_1^*)$ в виде:

$$W_1(s,\gamma_1^*) = \left(\frac{\gamma_1^* + 3\sqrt{\gamma_1^*} + 12}{\gamma_1^* + 3}\right)\times$$

$$\times\frac{s + \left(3\sqrt{\gamma_1^*}\left(\sqrt{\gamma_1^*} + 3\right)\right)\Big/\left(\gamma_1^* + 3\sqrt{\gamma_1^*} + 12\right)}{s + 3(\gamma_1^* - 1)/(\gamma_1^* + 3)} =$$

$$= A(\gamma_1^*)\frac{s + B(\gamma_1^*)}{s + C(\gamma_1^*)}.$$

Графики функций $A(\gamma_1^*)$, $B(\gamma_1^*)$, $C(\gamma_1^*)$ приведены на рис. 3. На них $\underbrace{\lim A(\gamma_1^*)}_{\gamma_1^*\to\infty} = \infty$, $\underbrace{\lim B(\gamma_1^*)}_{\gamma_1^*\to\infty} = 3$, $\underbrace{\lim C(\gamma_1^*)}_{\gamma_1^*\to\infty} = 3$. Используя рис. 2 и 3, конструктору необходимо выбрать γ_1^* так, чтобы значение $B(\gamma_1^*)$ было выше нуля, а $I_{21}(\gamma_1^*)$ — близко к нулю. Подходящим мог бы быть весовой коэффициент $\gamma_1^* = 10$.

Заключение. Показано, что сконструированная оптимальная система для объекта, передаточная функция которого имеет корни на мнимой оси, свойством устойчивости не обладает.

Предложены ограничения, включение которых с некоторым весом в функционал, позволяет решить проблему робастной неустойчивости.

Эффективность предлагаемого способа продемонстрирована примером.

Библиографические ссылки

1. **Зотов М.Г.** Многокритериальное конструирование систем автоматического управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 375 с.

2. **Математические** основы теории автоматического регулирования [под ред. Б. К. Чемоданова]. М.: Высшая школа, 1971. 807 с.

УДК 004.896:681.518.2

Н.В. Корнеев, д-р техн. наук, **А.В. Гребенников**
(Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти)

niccyper@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Раскрыты перспективы развития интеллектуальных систем управления на транспорте. Разработана структура современной интеллектуальной системы управления для транспортного средства, определены её основные подсистемы, приведены математические зависимости, реализующие функции управления. Показана программно-аппаратная реализация предложенной структурно-функциональной схемы интеллектуальной системы для транспортного средства, где в качестве контрольного физиологического параметра были выбраны движение головы и рук водителя.

Ключевые слова: управление; интеллект; математические методы; алгоритмы; программно-аппаратное обеспечение; контроль состояния водителя.

Development prospects of intellect control systems for vechicle are opened. The structure of the modern intelligent control system for a vehicle is developed, its major subsystems is defined; mathematical dependensies implementing the control function are adduced. Software and hardware implementation of the proposed structural and functional scheme of intelligent control system for a vehicle is shown, where a movement of the driver head and hands were selected in the capacity of control of physiological parameter.

Key words: control; intellect; mathematical methods; algorithms; software and hardware; control of the driver condition.

Введение. Два обстоятельства конца XX века форсировали интерес к искусственному интеллекту: прогресс в изучении мозга и в целом нервной системы человека; быстрое развитие средств вычислительной техники (ВТ) [1—7]. В настоящее время разработка подобных систем финансируется на государственном уровне, например, в рамках государственных контрактов на выполнение работ по федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013—2020 годах».

Для конца XX века характерно создание новых систем управления для ТС, в том числе бортовых, на основе микропроцессорных устройств. Если вначале это имело форму локальной автоматизации (для автомобилей — инжекторный управляемый двигатель внутреннего сгорания (ДВС), автоматические коробки перемены передач (КПП)), то затем пришло время спутниковой навигации, маршрутного компьютера и т.д. [5—7].

Постановка задачи. Динамика развития систем управления на транспорте настолько стремительна, что её можно сравнить с динамикой развития мобильных телефонов и гаджетов (рис. 1). Агентство Morgan Stanley (США) в своей «дорожной карте» указывает, что уже к 2022 г. на дорогах появятся автомобили-роботы. Дорожная карта — это наглядное представление пошагового сценария развития определённого объекта [8].

На рис. 1 видно, что предполагаемая кривая развития носит экспоненциальный характер, в то же время основными причинами его сдерживания остаются следующие факторы:

природное недоверие технике, постоянная рефлексия и естественное желание управлять самостоятельно, причём для одной группы людей — это проблема доверия технике, а для другой — попытка получить удовольствие от собственного управления, реализовать своё самовыражение, подчеркнуть принадлежность к определённой социальной группе;

отсутствие необходимой инфраструктуры. Интеллектуальным системам управления на транспорте необходимы интеллектуальные дороги, т.е. дороги, представляющие собой динамическую систему, способную управлять взаимодействием между автомобилем, асфальтом и дорожными знаками;

отсутствие общественных механизмов. Здесь основной проблемой остаётся проблема ответственности в случае ДТП. Кто будет виноват в случае ДТП — интеллектуальная система или реальный водитель? Ответ, кажется, лежит на поверхности — виноват тот, кто управляет, однако необходим общественный механизм доказательства факта управления, передачи управления от человека машине.

Стоимость интеллектуальной системы управления на транспорте не является сдерживающим фактором, по оценке специалистов компании Mercedes, стоимость с учётом модели вырастет всего лишь на несколько тысяч евро, в то время как суммарный эффект от распространения беспилотных автомобилей агентство Morgan Stanley только в США оценивает в 2,2 трл дол.

В настоящее время ведущие мировые корпорации предлагают свои системы управления для ТС. Помимо уже упомянутого немецкого концерна Mercedes, системы управления для ТС предлагают Nissan, BMW, Audi, Ford, Honda, Toyota, General Motors и даже Интернет корпорация Google.

Структура современной интеллектуальной системы управления для ТС включает в себя следующие основные подсистемы:

Pre-safe plus — подсистема безопасности, которая позволяет смягчить последствия удара при ДТП автомобиля сзади.

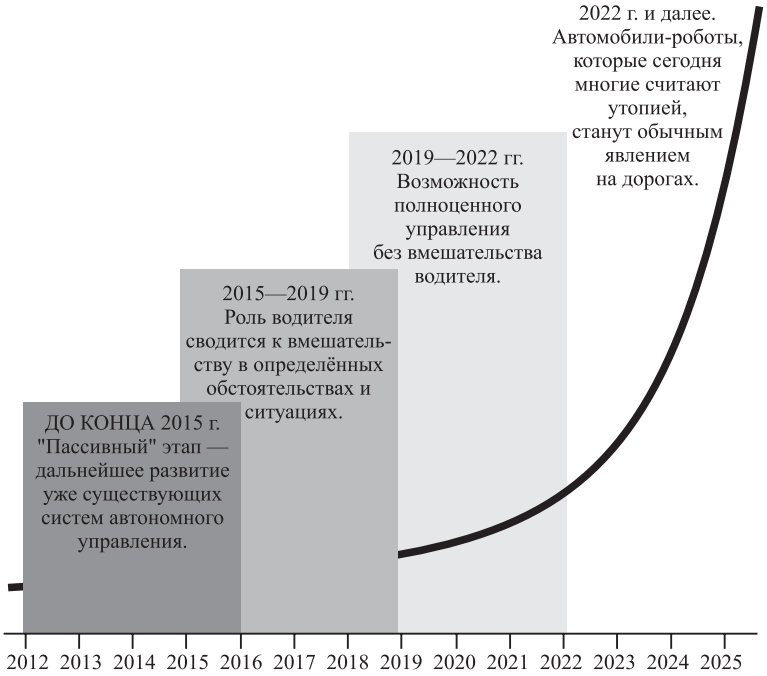

Рис. 1. Динамика развития систем управления на транспорте по данным агентства Morgan Stanley

Active blind spot assistant — подсистема контроля полосы движения автомобиля. Подсистема срабатывает, когда смене полосы движения автомобилю мешает наличие преград.

Distronic plus — подсистема коррекции скорости с учётом условий движения.

Night view assist plus — подсистема видеонаблюдения за дорожной ситуацией в ночное время.

Pre-safe brake — подсистема автоматического торможения.

Bas plus — подсистема для повышения тормозного усилия.

Adaptive hi-beam assist plus — подсистема для управления работой фар дальнего света.

Active lane keeping assist — подсистема стабилизации полосы движения. Подсистема срабатывает при уходе автомобиля с полосы движения, подавая вибросигнал.

Video system — подсистема видеонаблюдения за дорожной ситуацией.

Active parking assist — подсистема автоматической парковки.

Pre-safe impulse — подсистема безопасности, которая отодвигает пассажиров при боковом ударе.

Attention assist — подсистема контроля состояния водителя.

Collision prevention assist — подсистема безопасности, которая предупреждает о возможном столкновении.

В отечественной литературе подобные системы называют в настоящее время БОСЭС — бортовые оперативно-советующие экспертные системы, подчеркивая роль пилота в принятии решения, хотя БОСЭС даже могут вести огонь по противнику в случае нарушения функций пилота.

Эти обстоятельства требуют системного подхода к разработке основных концепций организации бортовых систем (БВС). При выборе направлений этих разработок основные решения формировались на основе следующих принципов: создание семейств устройств в виде унифицированных модулей (common modules) с унификацией 90 % программных и аппаратных функций [6, 7]; реализация базового (типового) модуля основных функциональных подсистем при сравнительно небольшом количестве специализированных устройств; организация техобслуживания на основе «сменных блоков» LRU (Line Repla-cable Unit), в качестве единицы выбирается базовый модуль, он же — LRU; пилот, прежде всего, реализует функции «системного управления», которые определяют основные цели всей системы, а операции на нижнем уровне осуществляют модули локального управления, входящие в состав БВС; управляющая БВС ориентирована в первую очередь на сложные процессы моделирования в реальном времени, относящиеся к уровню искусственного интеллекта (ИИ), и лишь потом на реализацию алгоритмов исполнительного уровня; взаимодействие БВС и пилота формирует общий «бортовой интеллект». При этом целесообразно изменяемое управление потоками информации как результат реагирования на изменение обстановки. Необходимо отметить, что, начиная с 1998 г. подобные публикации в США были закрыты для печати.

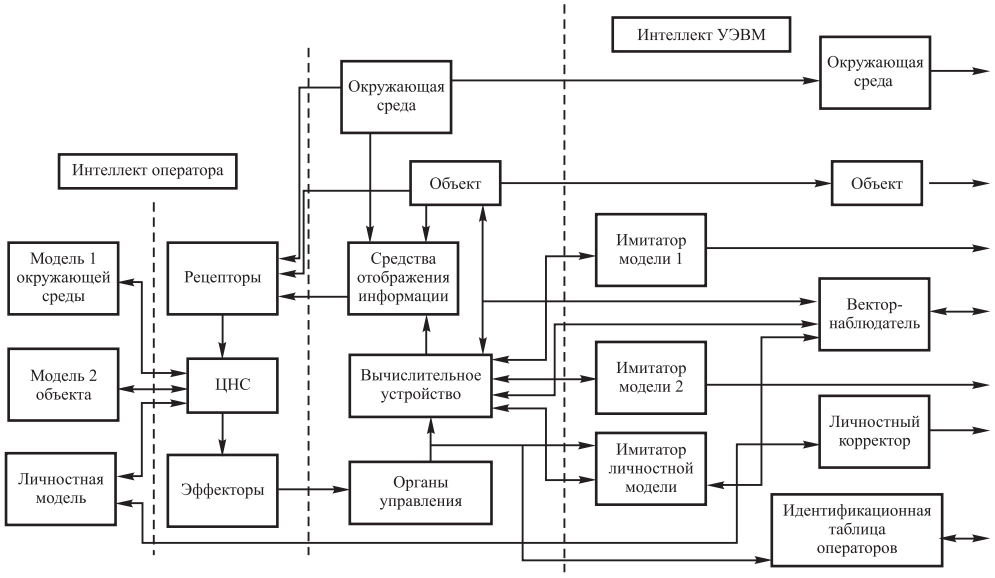

Рис. 2. Интеллектуальная система для программно-аппаратной реализации бортовых оперативно-советующих экспертных систем на транспорте

Методы решения. На рис. 2 приведена блочно-функциональная схема системы с элементами искусственного интеллекта (ИИ), учитывающая особенности рассматриваемых систем.

Система стала результатом развития блочно-функциональной схемы [7], дополнив обычную человеко-машинную систему (ЧМС) элементами ИИ, что показано в правой части рис. 2 в квадрате «Интеллект УЭВМ». К системе также отно-

сятся следующие вычислительные модели и модули: окружающая среда — «непосредственная» модель 1; объект — «непосредственная» модель 2; имитаторы: модель 1 окружающей среды у оператора; модель 2 объекта у оператора; личностной модели оператора; модуль личностного корректора; модуль вектора-наблюдателя.

Имитаторы моделей 1 и 2, а также личностной модели оператора имеют целью повторить в достаточно приближенном виде модели, которые существуют внутри оператора. Их задача — объяснить и предвидеть поведение оператора, обусловленное этими факторами. Например, водителю кажется, что двигатель неисправен. Личностная модель отображает его поведение при появлении такой гипотезы. Задача имитаторов, по возможности, точнее повторить свойства внутренних моделей.

Отличие «непосредственных» моделей объекта и окружающей среды в системе управления от внутренних моделей оператора и их имитаторов, т.е. есть отображения этих моделей, формируемых у оператора, состоит в следующем: непосредственная модель объекта — результат его диагностирования и текущего контроля в стационарных условиях и более подробно, т. е. это модель, значительно более точная, нежели внутренняя модель у оператора (особенно, если оператор имеет не очень высокую квалификацию); непосредственная модель окружающей среды может формироваться в системе управления объективно (программно и аппаратно), включая карты района текущей эксплуатации объекта; расстановку маяков, знаков и указателей; состояние атмосферы и дорожные условия; наличие динамических и других помех при движении; модели объекта и окружающей среды у оператора субъективны и деформируются его личностной моделью.

О задачах, решаемых личностным корректором и вектором-наблюдателем, подробно рассматривается в [6, 7]. В целом, как и идентификационная таблица операторов, эти модули имеют характер обработчиков накапливаемой информации и устройств формирования дополнительно диагностирующих действий и воздействий исполнительного характера.

Уравнения непосредственного отображения объекта и среды. Непосредственное отображение состояния объекта и среды основано на диагностической информации по объекту и наиболее полной — по состоянию среды, доступной для системы управления [7]:

$$\begin{aligned}\tilde{X}[k+1] &= \tilde{\Phi}(\tilde{X},U,\tilde{F},t)\tilde{X}[k]+\\ &+\tilde{\Gamma}(t)U[k]+\tilde{G}(t)\tilde{F}[k],\end{aligned} \quad (1)$$

где $\tilde{X}[k+1],\tilde{X}[k]$ — наиболее точные возможные оценки векторов состояния объекта и среды; $\tilde{\Phi}(\tilde{X},U,\tilde{F},t)$ — функция перехода, определяемая наиболее точно известными параметрами состояния объекта и среды; $\tilde{F}[k]$ — оценка вектора непосредственных воздействий окружающей среды; $\tilde{\Gamma}(t)U[k],\tilde{G}(t)\tilde{F}[k]$ — интегральные преобразования наиболее точно представленных управляющих и возмущающих воздействий.

Уравнения вторичного отображения объекта и среды в системе управления. Вторичным отображением будем называть уравнения вторичных моделей, отображающих в системе управления внутренние модели оператора. Их можно записать в виде, аналогичном уравнению (1), с использованием для обозначения вторичных модельных функций и оценок переменных знаком двойной черты сверху символа:

$$\begin{aligned}\overline{\overline{X}}[k+1] &= \overline{\overline{\Phi}}(\overline{\overline{X}},U,\overline{\overline{F}},t)\overline{\overline{X}}[k]+\\ &+\overline{\overline{\Gamma}}(t)U[k]+\overline{\overline{G}}(t)\overline{\overline{F}}[k],\end{aligned} \quad (2)$$

где $\overline{\overline{X}}[k+1],\overline{\overline{X}}[k]$ — оценки вектора состояния объекта и среды во вторичных моделях; $\overline{\overline{\Phi}}(\overline{\overline{X}},U,\overline{\overline{F}},t)$ — функция перехода вторичной модели, $\overline{\overline{F}}[k]$ — оценка вектора возмущающих воздействий во вторичной модели; $\overline{\overline{\Gamma}}(t)U[k],\overline{\overline{G}}(t)\overline{\overline{F}}[k]$ — преобразования воздействий вторичной модели.

Вектор переменных вторичных моделей состояния $\overline{\overline{Y}}[k]$ рассчитывается по формуле:

$$\overline{\overline{Y}}[k]=\overline{\overline{C}}\,\overline{\overline{X}}[k]+\overline{\overline{\upsilon}}[k],$$

где $\overline{\overline{\upsilon}}[k]$ — вектор помех измерений; $\overline{\overline{C}}$ — матрица формирования оценок измеримых переменных.

Уравнения вторичной личностной модели оператора. Эта модель строится аналогично с учётом уже известных из моделей объекта и среды функций:

$$\begin{aligned}\tilde{\tilde{Y}}[k+1] &= \tilde{\tilde{\psi}}(\tilde{\tilde{Y}},t)\tilde{\tilde{Y}}[k]+\tilde{\tilde{\psi}}(\overline{\overline{X}},t)\overline{\overline{X}}[k+1]+\\ &+\overline{\overline{\Gamma}}(t)(U[k])+\overline{\overline{G}}(t)\overline{\overline{F}}[k],\end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{\tilde{Y}}[k+1], \tilde{\tilde{Y}}[k]$ — векторы действий оператора по его вторичной модели; $\tilde{\tilde{\psi}}(\tilde{\tilde{Y}}, t)$ — функция перехода вторичной личностной модели оператора.

Согласно (3) действия оператора строятся на основе его внутреннего состояния и прогноза состояния объекта и среды. Таким образом, отдельно учитывается влияние прогноза состояния объекта и окружающей среды на формирование вектора управляющих действий оператора. Прогностические способности оператора для ТС имеют важное значение и требуют специального тестирования и развития.

Информационный поиск выявил много физиологических признаков, которые измеряют возбуждение, усталость или бдительность, т.е. векторы действий оператора по его вторичной модели (формула (2) и (3)). Это отражает информацию, относящуюся к методу, с помощью которого физиологический признак отражает физиологические переменные, корреляцию признака с выполнением работы, пороги нарушенной работоспособности и выводы, относящиеся к признаку.

Детальное рассмотрение восьми методов: электроэнцефалография (ЭЭГ); моргания глаз; движение глаз; PERCLOS; электродермальная активность (ЭДА); движения головы; электрокардиограмма (ЭКГ); движение рук, а также устройств контроля состояния водителя автотранспорта позволили сформулировать следующие выводы:

1. Анализ указанных устройств и систем показал, что все они имеют свои достоинства и недостатки, опираются на тот или иной метод контроля определённого параметра.

2. Ведутся разработки в сфере контроля состояния глаз, но общий недостаток всех этих систем — неспособность работать с солнцезащитными очками. Поэтому это направление рассматривать нецелесообразно.

3. Высокий уровень точности у параметра ЭЭГ. Для его измерения используется устройство мониторинга дремоты Drowsiness Monitoring Device (DMD) производства США. Главный его недостаток — крепление датчика на затылок и необходимость смазки проводящим гелем для корректной работы системы. Такой дискомфорт в управлении автомобилем неприемлем.

4. Вести измерения наклонов головы по принципу, используемому в приборе «Антисон», не следует, так как устройство реагирует на все движения и начинает выдавать ошибки по управлению, если даже водитель бодр. Это очень существенный недостаток. Система регистрации микронаклонов головы MicroNod Detection System (MINDStm) учитывает его, но архитектурно очень громоздка.

Авторами предложена интеллектуальная система, которая совмещает в себе все плюсы конкурентов, а также учитывает минусы и пожелания потребителей. В качестве контрольного физиологического параметра были выбраны движение головы и рук. Выбор физиологического параметра объясняется возможностью его максимально достоверно контролировать.

Программно-аппаратная бортовая оперативно-советующая экспертная система для контроля состояния водителя представлена на рис. 3.

Авторы предлагают прикрепить к голове водителя миниатюрный датчик движения, данные с которого будут поступать в микроконтроллер (МК) и анализироваться, а также установить датчик движения рулевого колеса, информация с которого тоже будет поступать на МК, где сигналы совместно обрабатываются.

Дальнейшая задача сводится к программной реализации интеллектуальной системы с учётом математических алгоритмов, приведённых в формулах (1)—(3). Задача реализована в

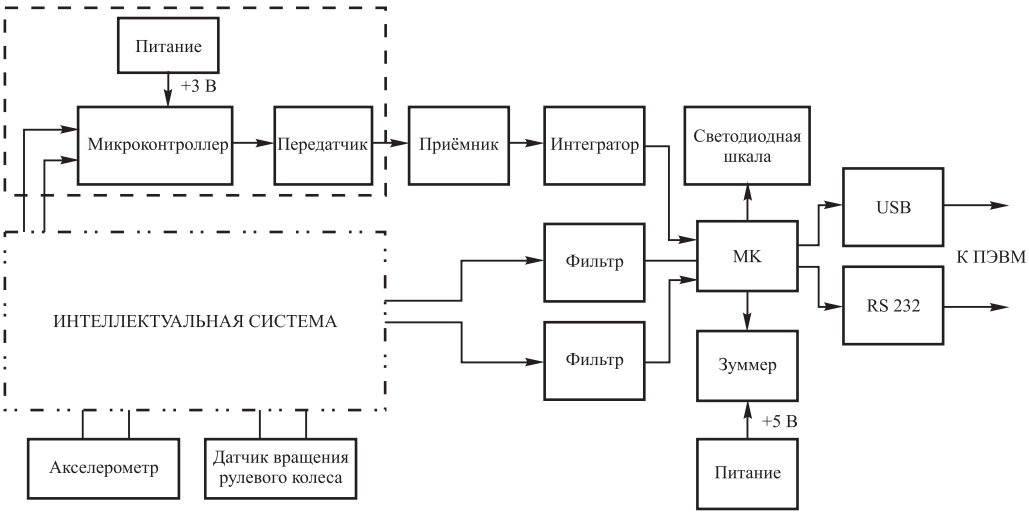

Рис. 3. Схема программно-аппаратной реализации ортовой оперативно-советующей экспертной системы на транспорте для контроля состояния водителя

виде специального программного обеспечения для интеллектуального контроля и оценки состояния водителя автотранспорта (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614903, 12.05.14).

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

снижение рисков дорожно-транспортных происшествий на любом транспорте посредством мониторинга и контроля состояния водителя транспортного средства с использованием новых интеллектуальных алгоритмов учёта физиологических параметров водителя при изменении его функционального состояния;

информационно-аналитическая оценка состояния водителя транспортного средства, осуществляемого с помощью новых программно-аппаратных устройств и микропроцессоров.

Заключение. Развитие методов моделирования сложных систем с элементами искусственного интеллекта требует создания средств получения характеристик оператора как части информационной системы. В данном случае предлагают ряд алгоритмов, основанных на гипотезе А.Ю. Ишлинского о том, что динамическая система любого порядка может быть эквивалентно заменена системой 3—5-го порядка.

Для рассматриваемого класса ЧМС эти алгоритмы состоят из двух групп: идентификация параметров личностной модели оператора; оценка текущих действий оператора по управлению объектом.

В середине XX века С. Роджером и Д. Лауэром было выделено 12 категорий стиля вождения, примерно тогда же венская школа предложила 15 категорий. При этом методика определения стиля основывалась на наблюдении и внедрялась медленно. Описанный выше подход позволяет ввести количественные оценки стиля оператора в ходе процесса, причём не только «глобальные», но и текущие — «локальные». Может быть учтён ряд факторов, в том числе степень утомления, влияние алкоголя, стрессов и т.д. При использовании аппарата многомерного шкалирования, теории нечетких множеств, функций принадлежности (в том числе переменных во времени), а также построения динамических моделей типа наблюдателей классификационные характеристики операторов становятся вполне достоверными и объективными. В какой-то мере стремление к этому отражено в формальном звании «класса» оператора.

По оценкам ряда психологов (У. Бингейм, Гринвуд, Х. Вудс), большая часть несчастных случаев на транспорте и в промышленности относится к группе со сравнительно малым количеством участников процесса, зависит от возраста, опыта и главное — их текущего состояния.

Если учесть, что в системах с элементами искусственного интеллекта должны использоваться методы «локальной» идентификации и сопоставления локальных и глобальных оценок данного оператора, можно утверждать, что при обнаружении более высокой его квалификации по таблице, должно иметь следствием ограничение функций системы с искусственным интеллектом по вмешательству в его действия и расширение оперативно-советующих функций.

Предложенная и разработанная авторами схема программно-аппаратной реализации бортовой оперативно-советующей экспертной системы на транспорте для контроля состояния водителя может быть использована для построения отечественной интеллектуальной системы управления для ТС.

Библиографические ссылки

1. **Винер Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. М.: Наука, 1983.

2. **Воронов А.А.** Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука, 1985. 697 с.

3. **Нечеткие** множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, В.Б. Тарасов и др. / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука. 1986. 312 с.

4. **Острем К., Виттенмарк М.** Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480 с.

5. **Корнеев Н.В.** Микропроцессорный блок управления и контроля движения автомобиля // Автомобильная промышленность. 2008. № 8. С. 19—21.

6. **Корнеев Н.В.** Принципы построения современных технических систем с элементами искусственного интеллекта // Техника машиностроения. 2008. № 2. С. 2—7.

7. **Корнеев Н.В., Кустарёв Ю.С., Морговский Ю.Я.** Теория автоматического управления с практикумом. М.: Академия, 2008.

8. **Lee S., Park Y.** Customization of technology roadmaps according to roadmapping purposes: overall process and detailed modules // Technology Forecasting & Social Change. 2005. № 72. P. 267—583.

УДК 621.9.048.4

И.В. Познахирева, Р.С. Познахирев, А.Г. Янишевская, д-р техн. наук, проф.
(Омский государственный технический университет)

anna-yanish@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ CENTUM CS3000

Разработан алгоритм для оптимизации системы управления с использованием системы CENTUM CS3000. Описаны программное решение системы управления и преимущества использования данной системы. Приведены математически формулы, используемые для реализации модели.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом; система CENTUM CS3000; распределённая система управления; противоаварийная защита; заслонка.

Algorithm for optimization of control systems with the use of CENTUM CS3000 is developed. Software solution management system and the benefits of using this system are described. Mathematical formulas used to implement the model are given.

Key words: automated control system of technological process; system CENTUM CS3000; distributed control system; emergency protection; damper.

Внедрение информационных технологий в сферу производства развивалось по пути создания информационных систем. Однако главная проблема комплексной автоматизации не была решена, но при этом был накоплен опыт разработок подобных систем и подготовлены специалисты, способные решать задачи внедрения информационных технологий в управление бизнесом на современном уровне.

В АСУТП объектами управления являются технологические процессы, представляющие совокупность способов и средств проведения конкретных производственных операций по изготовлению промышленной продукции [1]. Системы позволяют контролировать технологические параметры, определяющие режим и качество обработки, состояние механизмов и др. Задачей управления является оптимизация этих параметров. АСУТП характеризуется возможностью полного исключения человека из контура управления.

Важным преимуществом АСУТП является уменьшение влияния человеческого фактора на управляемый процесс, сокращение численности штата работников, экономия сырья и расходных материалов, повышение качества производимой продукции, что в конечном итоге влияет на эффективность производства.

Основные функции АСУТП: контроль и управление; обмен данными; обработка, накопление и хранение информации; формирование сигналов тревог, построение графиков и отчётов.

Системой, отвечающей описанным выше функциям АСУТП, является CENTUM CS3000 фирмы YokogawaElectric (Япония).

Реализация системы управления на базе однородной программной и аппаратной среды CENTUM CS3000 создаёт необходимые условия удобства эксплуатации АСУТП в целом, повышает ремонтопригодность АСУТП и, следовательно, её надёжность.

Системы управления CENTUM CS3000 представляют собой измерительно-вычислительные и управляющие комплексы, предназначены для автоматизации управления производственными процессами в различных отраслях промышленности [2]. Системы CENTUM CS3000 строятся по модульному принципу и обеспечивают восприятие измерительной информации, представленной сигналами силы и напряжения постоянного тока 4—20 мА, ±10 В, сигналами термопар и термометров сопротивлений различных градуировок; преобразование двоичных кодов в аналоговые сигналы силы и напряжения постоянного тока 4—20 мА, 0—10 В; восприятие и обработку кодированных дискретных электрических сигналов; обработку измерительной информации; выработку управляющих и регулирующих воздействий по различным законам регулирования в виде аналоговых и дискретных сигналов.

В системе CENTUM CS3000 в качестве основного блока РСУ (распределённая система управления) и системы ПАЗ (противоаварийная защита) выбирается дублированная станция управления AFV10D с дублированными локальными узлами ANB10D. ПАЗ обеспечивает в критических условиях гарантированную реализацию аварийной сигнализации и алгоритмов защитных блокировок технологического процесса [2].

Основные технические средства системы управления резервированы. При выходе из строя какого-либо из устройств РСУ и система ПАЗ должны автоматически переходить на резервное устройство с выдачей соответствующего сообщения и без остановки технологического процесса.

Технические характеристики станции управления CENTUM CS3000 отвечают всем требованиям, предъявляемым к РСУ и ПАЗ, с точки зрения функциональных возможностей реализации любых для данного класса объектов задач управления и противоаварийной защиты.

В АСУТП обеспечивается аппаратное и программное дублирование основных модулей.

Аппаратное дублирование — это физическое дублирование основных модулей: блоков центрального процессора, блока питания процессоров, коммутационных блоков системной сети V-net и шины ESB-bus [2].

Программное дублирование обеспечивает автоматический перевод блока, находящегося в резерве, в режим выполнения основных функций в случае отказа рабочего блока.

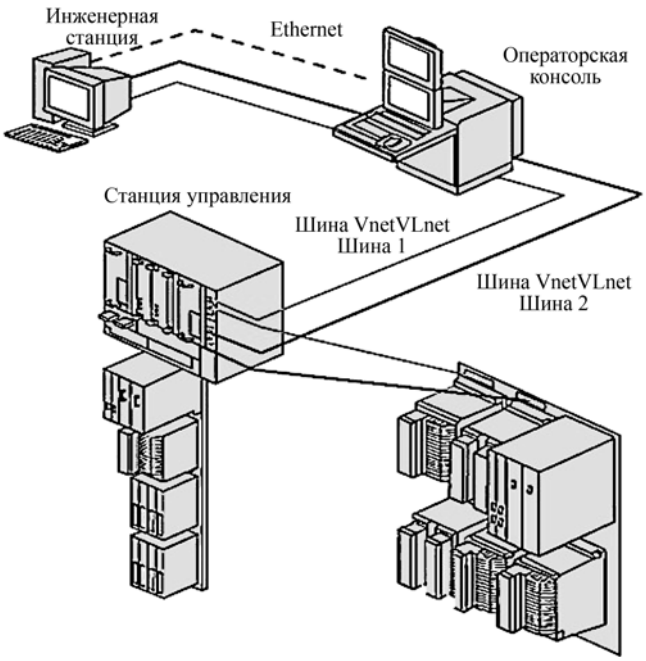

Рис. 1. Система управления CENTUM CS3000

Программное обеспечение системы CENTUM CS3000 автоматически обеспечивает безударный перевод работы на резервные блоки, поэтому при конфигурации конкретной АСУТП на прикладном уровне задачи дублирования решать нет необходимости.

Диагностические средства системы CENTUM CS3000 фиксируют изменение состояния любого блока, а аппаратные позволяют заменять вышедшие из строя блоки без отключения питания со станции управления, что значительно сокращает время восстановления оборудования и повышает надёжность.

Станции РСУ и ПАЗ имеют в своём составе блок центрального процессора, блок питания процессора, интерфейсную плату шины ESB-bus, коммутационный блок системной сети V-net/IP и коммутационный блок шины ESB-bus.

Локальные узлы также имеют в своём составе блок питания процессора, коммутационный блок шины ESB-bus и установочные места под модули ввода/вывода.

В локальные узлы могут устанавливаться различные типы модулей ввода/вывода.

Система управления обеспечивает перевод объекта в безопасное состояние при возникновении предаварийной ситуации.

При возникновении нештатной ситуации (сбой электропитания, отказ одного из контроллеров, отказ линии связи или рабочей станции) функционирование АСУТП продолжается за счёт резервного оборудования и источников бесперебойного питания.

В случае аварийной ситуации технологического процесса осуществляется отработка алгоритмов ПАЗ, обеспечивающих перевод исполнительных механизмов и агрегатов на безопасный режим работы. В данном случае технологический персонал получает всю необходимую информацию на рабочие станции, что позволяет оперативно принять меры на устранение неисправностей.

Система управления CENTUM CS3000 (рис. 1) относится к классу распределённых систем управления крупнотоннажными производствами.

Распределённая система управления, базирующаяся на комплексе технических средств (КТС) системы CENTUM CS3000, предназначена для управления технологическим процессом совместно с оперативным персоналом в режиме реального времени и предостав-

ления информации (технологических схем, трендов, отчётов и др.).

Система противоаварийной автоматической защиты, базирующаяся на КТС системы CENTUM CS3000, предназначена для автоматического перевода технологического процесса в безопасное состояние при возникновении предаварийных ситуаций.

Оператор следит за ходом технологического процесса по графическим изображениям (мнемосхемам) объекта автоматизации. Работа с системой осуществляется с помощью мыши и специализированной клавиатуры оператора.

Для каждого элемента управления (насоса, клапана и др.) в системе существует программный модуль, отвечающий за его работу. В функции модуля входит: отображение информации о состоянии объекта; управление объектом (в автоматическом режиме); передача командных сигналов, выданных оператором или системой, в контроллер; выдача аварийных сообщений при отклонении от нормы.

Такие модули в системе называются функциональными блоками, каждый из которых имеет своё уникальное системное имя (например F2120) и панель управления (лицевую панель), представляющую собой специальное окно, с помощью которого можно наблюдать за состоянием функционального блока, а также управлять им.

В системе существуют несколько групп сообщений: аварийные сообщения о технологическом процессе; системные; информационные.

Любое сообщение сопровождается звуковым сигналом.

Также имеется общий архив, вмещающий всю информацию о работе системы за некоторый период. Каждое действие оператора или системы над каким-либо функциональным блоком фиксируется в этом архиве.

В систему входят средства для хранения и отображения данных за достаточно большие промежутки времени — это тренды (графики) и отчёты (рапорты).

Система управления позволяет заменить морально устаревшее и физически изношенное оборудование КИПиА на новую современную распределённую систему управления и регулирования для получения высококачественной продукции.

АСУТП предназначена для выполнения следующих функций: стабилизации заданных режимов технологического процесса путём контроля значений технологических параметров, визуального представления и выдачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы как в автоматическом режиме, так и в результате действий технолога-оператора; определения предаварийных ситуаций на технологических узлах путём опроса подключённых к системе датчиков в автоматическом режиме, анализа измеренных показаний и переключения технологического процесса в безопасное состояние выдачей управляющих воздействий на исполнительные механизмы в автоматическом режиме или по инициативе оперативного персонала [1].

Интерфейс оператора реализован на АРМ (автоматизированное рабочее место) оператора. Рабочие станции оператора предназначены для отображения технологической информации; контроля состояния хода технологического процесса; контроля состояния технологического оборудования; управления технологическим процессом и оборудованием; ведения информационной базы данных; формирования и выдачи отчётной документации; протоколирования событий.

АРМ оператора выполнено на базе персонального компьютера, на котором установлено специализированное программное обеспечение системы CENTUM CS3000, функционирующее с помощью операционной системы Microsoft Windows XP SP2.

Перед эксплуатацией системы управления в компьютер необходимо загрузить специализированное программное обеспечение системы CENTUM CS3000, а затем — разработанное прикладное программное обеспечение (проект).

После проверки правильности функционирования специализированного системного и разработанного прикладного программного обеспечения можно приступать к эксплуатации РСУ и ПАЗ.

Система CENTUM CS3000 реализована на платформе Windows XP SP2, что определяет многооконный интерфейс оператора.

Графический интерфейс системы управления обеспечивает наглядное представление текущего состояния объекта и предоставляет технологу возможность управления.

Реализуем математическую модель и спроектируем систему управления установкой смешивания двухкомпонентного топлива, технологическая схема которой представлена на рис. 2.

Основными режимами работы установки смешивания двухкомпонентного изделия является: подача основного компонента (жидкого) до определённого уровня заполнения,

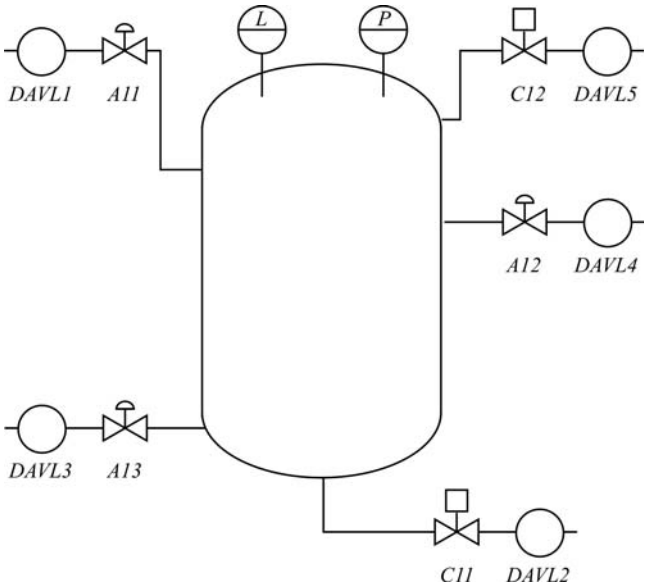

Рис. 2. Технологическая схема установки:
A11—A13 управляемые заслонки подачи основного компонента, инертного газа, катализатора; *C11—C12* отсечные клапаны слива готового продукта; сброса давления из ёмкости; *P* — датчик давления в ёмкости; *L* — датчик уровня заполнения ёмкости; *DAVL1—DAVL5* — датчики давления основного компонента, противодавления слива, катализатора, инертного газа; противодавления фильтрующей системы сброса соответственно

а также подача катализатора (газообразного) по заданной программе функции времени и слив готового продукта.

Технологический регламент работы по этапам:

а) закрыть и зафиксировать управляющие сигналы заслонок *A11—A13*, клапана *C11* и открыть клапан *C12*, дождаться выравнивания давления в ёмкости с давлением фильтрующей системы;

б) заполнить ёмкость основным компонентом до заданного уровня L_0;

в) закрыть и зафиксировать управляющие сигналы заслонки *A11*, клапана *C12*;

г) заполнить ёмкость катализатором согласно заданной программе, используя заслонку *A13*;

д) закрыть и зафиксировать управляющий сигнал на заслонку *A13*;

е) включить поддержание давления слива на заданном уровне P_0, используя заслонку *A12*;

ж) слить готовый продукт через клапан *C11* до заданного минимального L_0 уровня;

з) закрыть и зафиксировать управляющие сигналы заслонки *A12*, клапана *C11*;

и) возврат к п. а).

Исходные данные для проектирования системы управления установкой смешивания двухкомпонентного топлива приведены ниже.

Входные и выходные сигналы системы:

датчик давления *P* — входной аналоговый сигнал 4—20 мА, диапазон измерения $0—2\cdot10^6$ Па;

датчик уровня *L* — входной аналоговый сигнал 4—20 мА, диапазон измерения 0—5 м;

управляемые заслонки *A11—A13* — выходной аналоговый сигнал 4—20 мА, диапазон управления 0—90°;

отсечные клапаны *C11*, *C12* — выходной дискретный сигнал 24 В, 100 мА; концевые датчики отсечных клапанов *C11*, *C12* — входной дискретный сигнал 24 В, 100 мА; выходной сигнал модельного значения уровня *L*_MODEL — 4—20 мА; выходной сигнал модельного значения давления *P*_MODEL — 4—20 мА.

Характеристики заслонок: в качестве управляющих заслонок и отсечных клапанов используются клапаны производства EBRO ARMATUREN (Германия) серии HP—111e.

Данные клапаны имеют проливочные характеристики при $\Delta P = 10^5$ Па, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Проливочные характеристики заслонок

Управляемые заслонки и отсечные клапаны	Углы открытия, °										Инерционность
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
A11	0,0	0,0001	0,0036	0,0078	0,018	0,036	0,05	0,094	0,153	0,222	2,0
A12	0,0	0,0001	0,0003	0,0006	0,0022	0,0042	0,0059	0,0092	0,012	0,014	1,0
A13	0,0	0,0001	0,0003	0,0006	0,0022	0,0042	0,0059	0,0092	0,012	0,014	1,0
C11	0,0	0,0001	0,0006	0,0025	0,006	0,012	0,021	0,032	0,05	0,06	1,5
C12	0,0	0,0001	0,0003	0,0006	0,0022	0,0042	0,0059	0,012	0,012	0,014	1,0

Для моделирования колебаний источников давлений в трубопроводах используется формула:

$$P = P_0 + P_1\sin(w_1 t) + P_2\cos(w_2 t), \qquad (1)$$

где P — давление в трубопроводе; w — частота колебаний; t — время.

Номиналы коэффициентов приведены в табл. 2.

Параметры подачи давления катализатора (время и давление) приведены в табл. 3.

Выше было указано, что построение модели имитации работы источников давления основано на использовании формулы (1) для каждого источника. Реализацию данной формулы проще осуществить, используя вычислительный блок общего назначения CALCU.

Схема реализации модели имитации работы источников давления представлена на рис. 3.

Для реализации формулы (1) необходим таймер времени, так как блок CALCU его не имеет. Для этого в данной схеме использован стандартный блок таймера *TM* со следующими настройками: в закладке Basic: basic scan, second timer; в закладке ControlCalculation: periodic action — yes; в закладке Others: Constant — PH = 60.

Данные настройки означают, что будет использован секундный таймер с базовым периодом сканирования (вычисления) и с автоматическим перезапуском после достижения лимита времени 60 с.

В блоках CALCU в закладке EditCalculationScript записывается текст программы, единый для всех блоков CALCU (DAVL1—DAVL5): $w_1 = P_{03}$RV; $w_2 = P_{05}$RV; CPV = P_{01} + + $P_{02}\sin(w_1)$ + $P_{04}\cos(w_2)$.

В блоках CALCU в закладке Function Block Detail Definition необходимо изменить следующие настройки по умолчанию: в закладке Basic: TagComment — ввести имя комментария блока; в закладке Input: HighLimitValue — верхнюю границу отображения шкалы давления; LowLimitValue — нижнюю границу отображения шкалы давления; в закладке Others: Constant — P_{01}—P_{05} — необходимо присвоить значения констант для каждого блока отдельно (см. табл. 2).

Теоретические формулы для реализации модели. В общем виде уравнение заполнения ёмкости основным (жидким) компонентом имеет вид:

$$L = L_0 + \frac{1}{S_A}\int_0^t (Q_{in} - Q_{out})dt \qquad (2)$$

или, продифференцировав уравнение (2), получим приращение уровня в виде:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1}{S_A}(Q_{in} - Q_{out}), \qquad (3)$$

Таблица 2

Коэффициенты для моделирования источников давления

Наименование датчика давления	P_0	P_1	w_1	P_2	w_2
DAVL1	6,0	0,2	0,5	0,1	1,0
DAVL2	2	0,2	0,1	0,2	0,3
DAVL3	16,0	0,2	0,5	0,2	1,0
DAVL4	16,0	0,2	0,5	0,2	1,0
DAVL5	1,0	1,0	0,5	0,1	1,0

Таблица 3

Параметры подачи давления катализатора

Время, с	0	200	250	300
Давление 10^6, Па	0,15	1	1,2	1,2

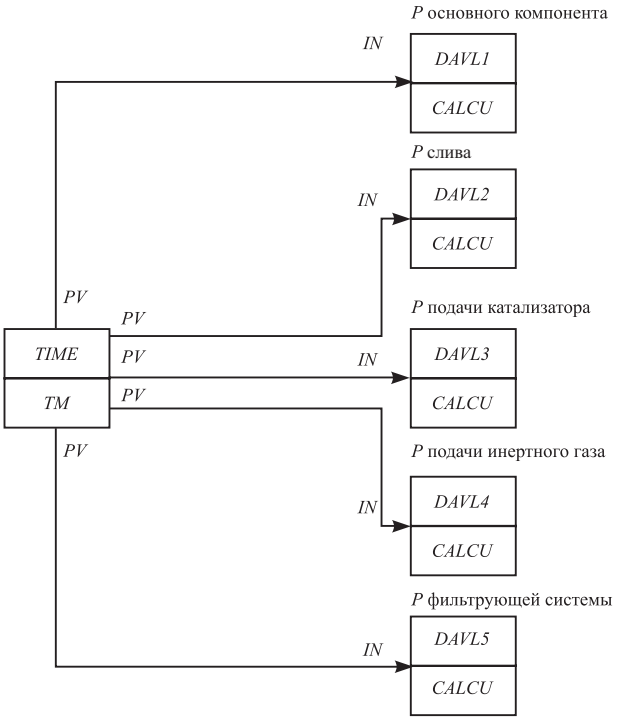

Рис. 3. Схема реализации модели имитации работы источников давления

где $\frac{dl}{dt}$ — приращение уровня жидкости в ёмкости;

Q_{in} — расход поступающей жидкости, объёмный расход через клапан *A11*; Q_{out} — расход вытекающей жидкости, объёмный расход через заслонку *C11*; S_A — площадь основания ёмкости.

Объёмный расход жидкости через заслонку, используя её проливочную характеристику, можно определить по формуле:

$$Q = Q_i(\alpha)(P_1 - P_2), \quad (4)$$

где $Q_i(\alpha)$ — проливочная характеристика заслонки; α — угол открытия заслонки; P_1 — давление на входе заслонки; P_2 — давление на выходе заслонки.

Изменение давления газа в незаполненной части ёмкости при её заполнении можно определить из соотношения:

$$P_0V_0 = P_1V_1, \quad (5)$$

где P_0 — давление газа в ёмкости; V_0 — объём газа в ёмкости.

Преобразовав формулу (5) в приращениях, получим:

$$P_0V_0 = (P_0 + dp)(V_0 + dV).$$

Раскрыв скобки и пренебрегая ничтожно малым членом $dpdV$, получим

$$dp = \frac{p_0}{V_0}dV = \frac{p_0}{L_0}dL, \quad (6)$$

где P_0 и L_0 — значения давления и уровня в ёмкости на предыдущем шаге интегрирования.

Связь давления и массы газа определяется уравнением состояния идеального газа:

$$PV = mRT. \quad (7)$$

Продифференцировав обе части уравнения (7) при условии постоянной температуры и постоянного объёма, получим:

$$dp = \frac{RT}{V}dm = \frac{RT}{V}\sum_{i=1}^{3}G_i, \quad (8)$$

где $\frac{RT}{V} = k(L)$ — коэффициент, зависящий от уровня заполнения ёмкости; $\sum_{i=1}^{3}G_i$ — суммарный массовый расход газа в ёмкость.

В свою очередь

$$\sum_{i=1}^{3}G_i = G_{A12} + G_{A13} - G_{C12}. \quad (9)$$

Сделав допущение, что как катализатор, так и инертный газ имеют линейную зависимость плотности от давления, то массовый расход через заслонку можно записать в виде:

$$G = Q\rho = Q_i(\alpha)(P_1 - P_2)\rho_0P_1, \quad (10)$$

где ρ_0 — плотность газа при давлении 10^5 Па.

Реализация модели заполнения ёмкости основным компонентом осуществляется на схеме управления DR0003 с использованием формул (2—4). Схема модели заполнения ёмкости представлена на рис. 4.

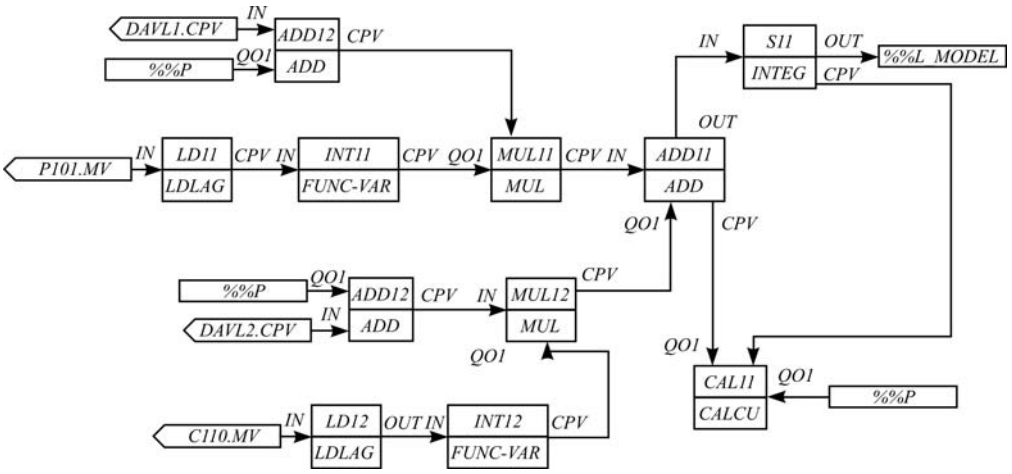

Рис. 4. Схема модели заполнения ёмкости основным компонентом

Ниже приведён принцип работы данной схемы.

Блок *ADD12* реализует значение разности давлений на заслонке *A11*. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 10,000, Low Limit Value —10,000, Engineering Unit Symbol — BAR; в закладке Others: Constant — GAIN = 1,0, GN1 = −0,2, BS1 = 0,0, BIAS = 0,0.

Блок *LD11* имитирует работу исполнительного элемента заслонки в режиме реального времени, фактически реализуя функцию апериодического звена 1-го порядка. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 90,0, Low Limit Value — 0,0, Engineering Unit Symbol — GRAD; в закладке Others: Constant — GAIN = 1,0, D = 0,0, I = 2,0.

Блок *INT11* реализует проливочную характеристику заслонки *A11*. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 0,5000, Low Limit Value — 0,0000, Engineering Unit Symbol — M3/S; в закладке Others: Constant — X01 =, Y01 =, ... SECT = 9. В закладку Others необходимо внести проливочную характеристику заслонки из табл. 1.

Блок *MUL11* позволяет вычислять объёмный расход через заслонку *A11* согласно формуле (4). В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 5,000, Low Limit Value — −5,000, Engineering Unit Symbol — M3/S; в закладке Others: Constant — GAIN = 1,0, GN1 = 1,0, BS1 = 0,0, BIAS = 0,0.

Блок *ADD13* реализует значение разности давлений на заслонке C11. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 10,000, Low Limit Value — −10,000, Engineering Unit Symbol — BAR; в закладке Others: Constant — GAIN = = −1,0, GN1 = −0,2, BS1 = 0,0, BIAS = 0,0.

Блок *LD12* имитирует работу исполнительного элемента заслонки во времени, фактически реализуя функцию апериодического звена 1-го порядка. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 90,0, Low Limit Value — 0,0, Engineering Unit Symbol — GRAD; в закладке Others: Constant — GAIN = 45,0, D = 0,0, I = 1,5.

Блок *INT12* реализует проливочную характеристику заслонки *C11*. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 0,5000, Low Limit Value — 0,0000, Engineering Unit Symbol — M3/S; в закладке Others: Constant — X01 =, Y01 =, ..., SECT = 9. В закладку Others необходимо внести проливочную характеристику заслонки из табл. 1.

Блок *MUL12* вычисляет объёмный расход через заслонку C11 согласно формуле (4). В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 5,000, Low Limit Value — −5,000, Engineering Unit Symbol — M3/S; в закладке Others: Constant — GAIN = 1,0, GN1 = 1,0, BS1 = 0,0, BIAS = 0,0.

Блок *ADD11* реализует значение разности расходов в ёмкости. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 1,000, Low Limit Value — −1,000, Engineering Unit Symbol — M3/S; в закладке Others: Constant — GAIN = 1,0, GN1 = −1,0, BS1 = 0,0, BIAS = 0,0.

Блок *S11* осуществляет операцию интегрирования с учётом площади основания ёмкости. В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке Input: High Limit Value — 5,0000, Low Limit Value — 0,0000, Engineering Unit Symbol — M; в закладке Others: Constant — GAIN = 0,5, I = 1,0.

В блоке *CAL11* вычисляются приращение давления согласно формуле (6) и значения коэффициента $k(L)$ для формулы (8). В нём необходимо сделать следующие настройки: в закладке EditCalculationScript записывается текст программы: CPV = RV2 0,1RV1/(5,0—RV); CPV1 = 20,0/(5,0—RV).

В закладке FunctionBlockDetailDefinition необходимо изменить следующие настройки по умолчанию: в закладке Input: High Limit Value — 10,0, Low Limit Value — −10,0, Engineering Unit Symbol — BAR.

Реализация модели заполнения ёмкости газообразными компонентами осуществляется на схеме управления DR0004 с использованием формул (6), (8—10).

Основная мнемосхема управления установкой представлена на рис. 5.

Разработанный алгоритм предназначен для уменьшения вероятности возникновения аварийных ситуаций; уменьшения количества выполняемых технологическим персоналом функций за счёт автоматизации; повышения качества и быстродействия регулирования и, как следствие, достижения высокого уровня стабилизации технологических режимов; повышения производительности установки за счёт улучшения качества регулирования и управления технологическим процессом; по-

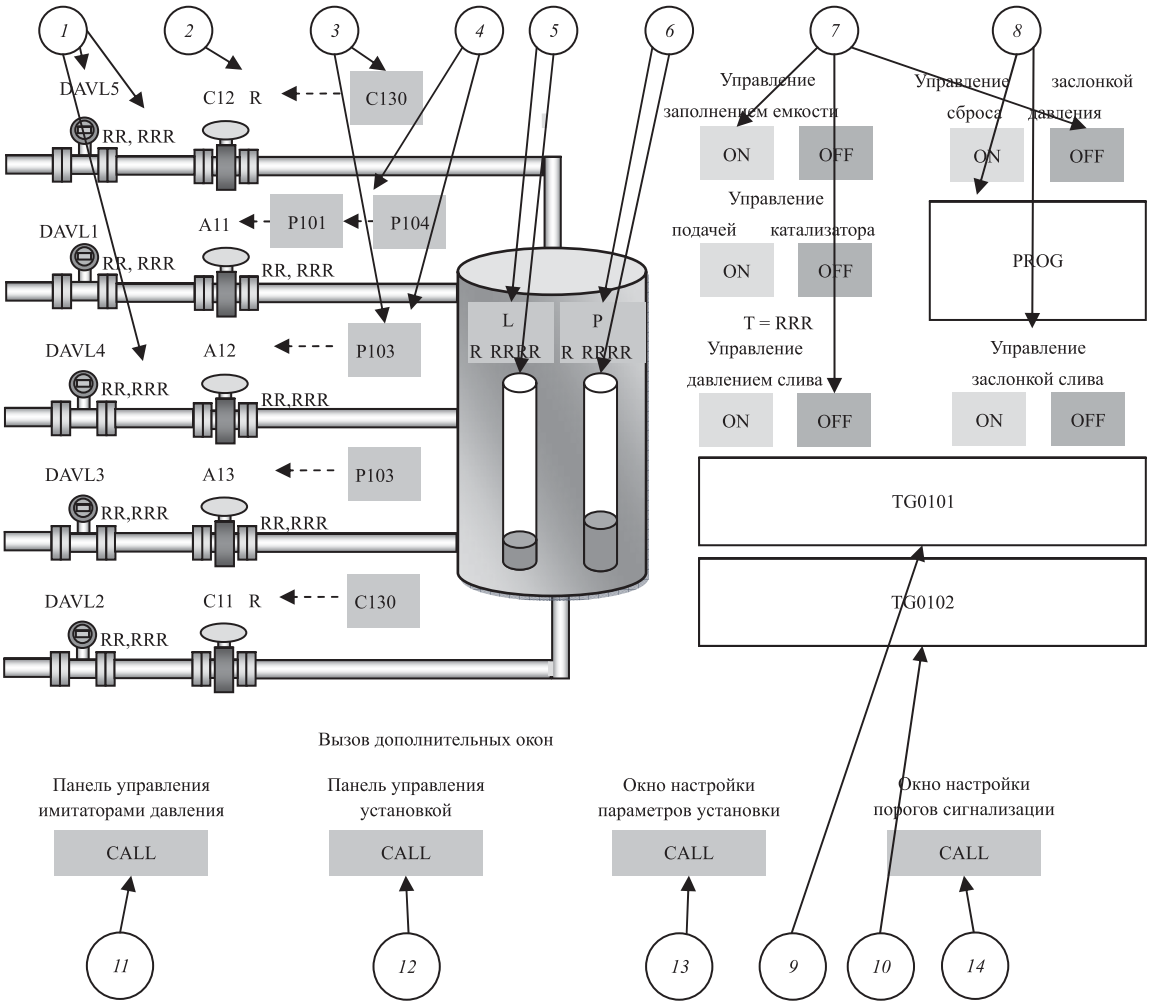

Рис. 5. Основная мнемосхема управления установкой:
1 — индикаторы и указатели точного давления в трубопроводах, при достижении верхних порогов сигнализации индикатор загорается красным цветом; *2* — индикаторы состояния заслонок с цветовой сигнализацией: дискретные при открытии загораются синим; регулирующие при открытии более 10° — синим, более 30° — зелёным; более 70° — желтым, более 80° — красным; *3* — кнопки вызова встроенных окон настройки регуляторов непрерывного управления и блоков переключающих устройств; *4* — указатели сигнала управления с ПИД-регуляторов; *5* — индикатор и указатель точного уровня заполнения ёмкости (используется переменная PV ПИД-регулятора Pn01), при достижении первого верхнего порога предупреждающей сигнализации окантовка столбика индикатора загорается жёлтым цветом, второго верхнего — красным; *6* — индикатор и указатель точного давления в ёмкости (используется переменная PV ПИД-регулятора Pn02), при достижении первого верхнего порога предупреждающей сигнализации окантовка столбика индикатора загорается жёлтым цветом, второго верхнего — красным; *7* — кнопки управления свитчами, текущее состояние свитчей показывается зелёным цветом; *8* — индикатор и указатель точного времени с момента начала работы программатора; *9* — локальное окно трендовой страницы регуляторов заполнения, при двойном нажатии открывается в полном объёме; *10* — локальное окно трендовой страницы регуляторов давления, при двойном нажатии открывается в полном объёме; *11* — кнопка вызова окна панелей управления имитаторами давления; *12* — кнопка вызова окна панелей управления установкой; *13* — кнопка вызова окна настроек технологических параметров установки; *14* — кнопка вызова окна настроек аварийных сигнализаций

вышения информационного обеспечения технологического и эксплуатационного персонала; повышения надёжности работы самой системы управления за счёт применения современных технических устройств на основе электронных и вычислительных средств и наличия самодиагностики; уменьшения материальных и энергетических затрат.

Библиографические ссылки

1. **Глизенте Л.** Современные технологии автоматизации: Критерии выбора компонентов с уровнем SIL 3 для РУ и систем ПАЗ в соответствии со стандартами МЭК М.: СТА-ПРЕСС, 2010. 500 с.

2. **Панкратов Д.А.** Распределённая система управления Centum CS3000R3: Опыт внедрения АСУТП сульфат-целлюлозного завода на базе РСУ CENTUM CS3000 фирмы Иокогава. СТА-ПРЕСС, 2011. 50 с.

УДК 519.246.8

Д.С. Бубырь, **Е.М. Булыжев,** д-р техн. наук, проф.,
Ю.А. Грехов, В.Н. Клячкин, д-р техн. наук, проф., **Г.А. Орлов**
(Ульяновский государственный технический университет)

v_kl@mail.ru

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Для оценки качества питьевой воды предложены регрессионные зависимости показателей качества от физико-химических показателей источника водоснабжения и управляемых параметров, характеризующих работу системы очистки. Выяснено, что для построения регрессий с целью прогноза целесообразно использовать кусочно-линейные модели по выборке объёмом 30—50 наблюдений. Модели могут быть использованы для своевременного предупреждения аварийной ситуации, когда показатели качества воды превышают пределы допуска.

Ключевые слова: качество питьевой воды; система водоочистки; показатели водоисточника; прогнозирование; кусочно-линейные регрессии.

To assess the quality of drinking water quality indicators regression depending on the physico-chemical parameters of the water source and the control parameters suggested that characterize the work of the cleaning system. It was found that for the purpose of constructing the regression prediction is advisable to use a piecewise linear model based on a sample volume of 30—50 observations. Models can be used for early warning of an emergency, when water quality exceeds the limits of tolerance.

Key words: quality of drinking water; water treatment system; indicators of water sources; forecasting; piecewise linear regression.

Рассматривается система водоочистки Санкт-Петербургского водоканала «Западный Кронштадт», в которой контролируется семь показателей качества питьевой воды, шесть физико-химических параметров водоисточника, а также два управляемых параметра (дозы коагулянта и флокулянта, используемых при очистке воды). Обозначения соответствующих параметров приведены в таблице.

Ввиду возможного нарушения качества питьевой воды, вследствие ухудшения физико-химических показателей источника водоснабжения необходима методика раннего предупреждения превышения одним или несколькими показателями качества воды допустимых пределов. Задача исследования — разработка методики моделирования и прогнозирования качества питьевой воды и автоматизация процесса с помощью специального программного обеспечения для своевременного предупреждения об аварийной ситуации, связанной со снижением качества воды.

Построение регрессионных моделей. Выявление регрессионных зависимостей $Y_i = f_i(X_1, X_2, ..., X_8)$ между Y_i ($i = \overline{1,7}$) и X_j ($j = \overline{1,8}$) осуществлялось таким образом, чтобы коэффициент детерминации R^2, характеризующий точность моделей, был по возможности близок к единице [1, 2].

Контролируемые показатели качества

Группа	Обозначение	Определение
Физико-химические показатели источника водоснабжения	X_1	Температура
	X_2	Цветность
	X_3	Мутность
	X_4	pH
	X_5	Щёлочность
	X_6	Окисляемость
Управляемые факторы	X_7	Доза коагулянта
	X_8	Доза флокулянта
Показатели качества питьевой воды	Y_1	Цветность
	Y_2	Содержание алюминия
	Y_3	pH
	Y_4	Содержание хлоридов
	Y_5	Остаточный хлор
	Y_6	Окисляемость
	Y_7	Щёлочность

Для поиска регрессий использовалась выборка, состоящая из данных мониторинга системы за год. Процедура моделирования и перебора возможных регрессий осуществлялась в интегрированной системе комплексного статистического анализа и обработки данных STATISTICA [3].

Проведённые исследования показали, что «глобальные» модели, данные которых использовались за весь год, обладают недостаточно высокой точностью, что можно объяснить неоднородностью физических свойств системы на области значений регрессоров. Лучшие результаты получены при применении «локальных» моделей, использующих данные наблюдений за один-полтора месяца. При этом моделирование и прогнозирование проводилось на основе кусочно-линейной регрессии с разрывом по отклику [4]. Было достигнуто значительное повышение коэффициента детерминации (например, для отклика Y_5 с 0,46 до 0,98).

В общем виде кусочно-линейная регрессионная модель с учётом авторегрессионной составляющей запишется в виде:

$$\begin{aligned} Y(t) = {} & (\beta_{11}X_1 + \beta_{21}X_2 + \\ & + \ldots + \beta_{m1}X_m + \beta_{m+1,1}Y(t-1) + \ldots + \\ & + \beta_{m+k,1}Y(t-k))(Y(t) \leqslant c) + (\beta_{12}X_1 + \beta_{22}X_2 + \\ & + \ldots + \beta_{m2}X_m + \beta_{m+1,2}Y(t-1) + \\ & + \ldots + \beta_{m+k,2}Y(t-k))(Y(t) > c), \end{aligned} \qquad (1)$$

где m — количество регрессоров в модели; k — порядок авторегрессии; c — точка разрыва; X_1, X_2, ..., X_m — регрессоры (физико-химические факторы, характеризующие состояние водоисточника); $(Y(t) \leqslant c)$, $(Y(t) > c)$ — логические выражения, принимающие значения: 1 — если истинно, 0 — если ложно; $Y(t-1)...Y(t-k)$ — значение отклика (показателей качества питьевой воды) в предыдущие моменты времени.

Фактически данная модель состоит из двух регрессий, каждая из которых применяется для определённого уровня отклика.

Прогнозирование. Для прогнозирования по кусочно-линейной модели используется следующий способ. Вычисляется прогноз по обоим «кускам» регрессии, полученный результат сравнивается со значением отклика в точке разрыва c. Если прогноз по первому куску меньше или равен c, а по второму куску — больше, то за итоговый результат принимается среднее арифметическое этих чисел. Если хотя бы для одного куска наблюдается нарушение этих неравенств, то итоговым значением считается прогноз по тому куску, для которого неравенство выполняется. Если же условия нарушаются для обоих случаев, то также вычисляется среднее арифметическое.

Например, имеется кусочно-линейная регрессия:

$$Y = Y_1(Y \leqslant c) + Y_2(Y > c), \qquad (2)$$

где $Y_1 = (b_{01} + b_{11}X_1 + \ldots + b_{m1}X_m)$;
$Y_2 = (b_{02} + b_{12}X_1 + \ldots + b_{m2}X_m)$.

Пусть на основе регрессий Y_1 и Y_2 получены прогнозы $\widehat{Y}_1$ и $\widehat{Y}_2$, причём $\widehat{Y}_1 \leqslant c$ и $\widehat{Y}_2 < c$. В данном случае имеет место нарушение для второй регрессии, поэтому за итоговый прогноз берётся $\widehat{Y}_1$.

Система прогнозирования качества питьевой воды обеспечивает обработку данных по качеству очистки воды. Соответствующее программное обеспечение решает задачи моделирования и прогнозирования значений показателей качества питьевой воды на четыре дня вперёд, предупреждения о возможном нарушении процесса (прогнозе выхода одного или нескольких контролируемых показателей за пределы допуска (рис. 1), сохранения полученных результатов.

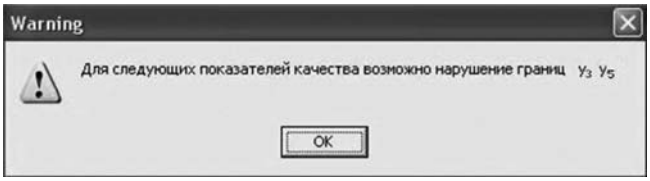

Рис. 1. Окно предупреждения о возможном превышении показателей качества воды пределов допуска

В процессе моделирования осуществляется поиск оптимальной модели: рассматриваются кусочно-линейные модели с порядком авторегрессии до второго включительно (в ходе исследования выяснилось, что модели более высоких порядков точность не увеличивают), и оптимального объёма моделирующей выборки (размера входных данных).

Модели сравниваются по минимальному значению среднего процента ошибки прогноза. Исходная выборка делится на модельную и контрольную части. По модельной выборке строятся различные варианты модели, контрольная (её объём составляет примерно 10 % от общего количества наблюдений) используется для прогнозирования и оценки качества модели. В результате для каждого показателя качества воды Y_i получается своя оптимальная модель.

Рис. 2. Алгоритм работы системы прогнозирования качества питьевой воды

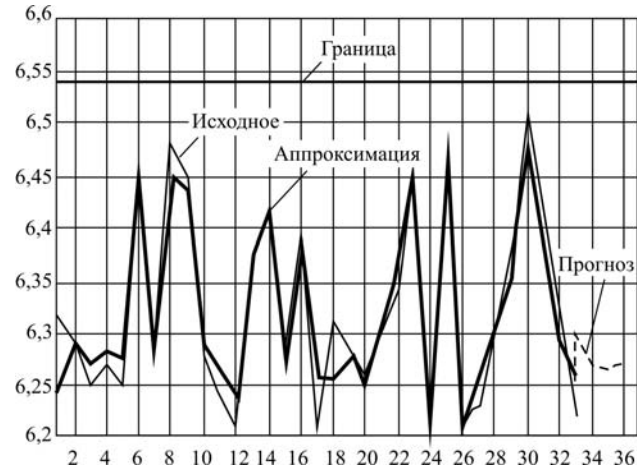

Рис. 3. Зависимости исходного и аппроксимированного рядов и прогноза

На рис. 2 показан алгоритм работы системы.

Численное исследование. В качестве исходных данных использовались результаты наблюдений контролируемых параметров за август—сентябрь 2012 г.

В результате моделирования для каждого показателя качества воды построена модель кусочно-линейной регрессии оптимального порядка по выборке оптимального размера. Например, для показателя Y_1 (цветность) модель имеет вид:

$$\begin{aligned} Y_1(t) = {} & (0{,}114X_1 - 0{,}466X_2 - 0{,}023X_3 - \\ & - 1{,}907X_4 - 4{,}624X_5 + 0{,}088X_6 + 4{,}799X_7 + \\ & + 13{,}847X_8)(Y_1(t) \leqslant 5{,}516) + \\ & + (3{,}655X_1 + 0{,}163X_2 + 0{,}840X_3 - \\ & - 13{,}188X_4 + 73{,}006X_5 - 1{,}926X_6 - \\ & - 1{,}101X_7 + 176{,}470X_8)(Y_1(t) > 5{,}516); \end{aligned}$$

для показателя Y_2 (содержание алюминия):

$$\begin{aligned} Y_2(t) = {} & (0{,}002X_1 + 0{,}004X_2 + 0{,}003X_3 + \\ & + 0{,}009X_4 - 0{,}043X_5 + 0{,}001X_6 - \\ & - 0{,}030X_7 + 0{,}257X_8 + 0{,}110Y_2(t-1) - \\ & - 0{,}262Y_2(t-2))\ (Y_2(t) \leqslant 0{,}068) + \\ & + (0{,}009X_1 + 0{,}006X_2 + 0{,}014X_3 + \\ & + 0{,}043X_4 - 0{,}185X_5 - 0{,}005X_6 - \\ & - 0{,}058X_7 - 0{,}405X_8 - 0{,}422Y_2(t-1) + \\ & + 0{,}354Y_2(t-2))\ (Y_2(t) > 0{,}068), \end{aligned}$$

и т. п.

На рис. 3 показаны графики исходных данных (тонкая линия), аппроксимации по соответствующей модели (жирная линия), прогноза (штриховая линия), а также линия, соответствующая верхней границе допуска.

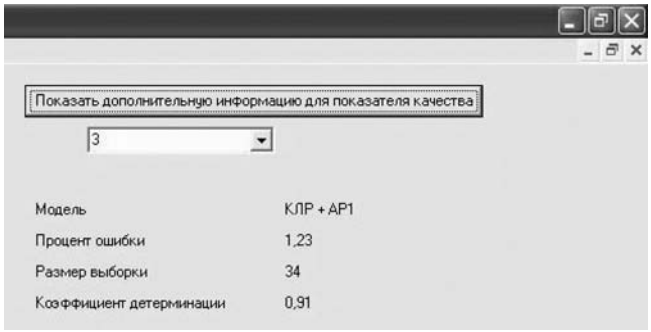

Рис. 4. Дополнительная информация для показателя pH

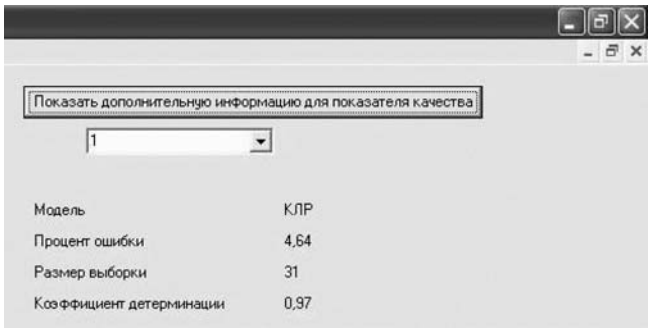

Рис. 5. Дополнительная информация для показателя цветность

На рис. 4 и 5 представлена дополнительная информация для показателей качества питьевой воды pH (X_3) и цветность (X_1), для которых получены модели кусочно-линейной регрессии с элементом авторегрессии первого порядка (КЛР + АР1) и простой кусочно-линейной регрессии соответственно (КЛР).

В результате регрессионного моделирования показателей качества питьевой воды установлено, что необходимая для прогнозирования точность обеспечивается при использовании «локальных» кусочно-линейных моделей. Разработанное специальное программное обеспечение позволяет проверить влияние различных модификаций регрессии и объёма выборки на точность прогнозирования показателей, а также выбрать оптимальный вариант для каждого случая. Результаты численных исследований свидетельствуют об эффективности использования предложенной методики при моделировании и прогнозировании показателей качества воды. Для контроля стабильности работы системы водоочистки можно использовать методы многомерного статистического контроля [5, 6].

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки России № 2014/232.

Библиографические ссылки

1. **Валеев С.Г., Булыжев Е.М.** Системы раннего предупреждения аномальной ситуации при анализе состояния СОЖ // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 10. С. 39—42.

2. **Валеев С.Г.** Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М.: Наука, 1991. 272 с.

3. **Халафян А.А.** STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

4. **Клячкин В.Н., Бубырь Д.С.** Прогнозирование состояния технического объекта на основе кусочно-линейных регрессий // Радиотехника. 2014. № 7. С. 137—140.

5. **Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А.** Повышение эффективности статистического контроля многопараметрического технологического процесса на основе карты Хотеллинга с предупреждающей границей // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 10. С. 35—37.

6. **Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А., Святова Т.И.** Методы повышения эффективности многомерного статистического контроля // Наукоёмкие технологии. 2013. № 5. С. 53—58.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

учебник

С.И. Богодухов, Е.С. Козик

Цена 800 р.

2015 г. 504 с. ISBN 978-5-94275-775-5

Рассмотрены вопросы кристаллического строения металлов, механические свойства, теория сплавов, диаграмма железо–углерод, углеродистые стали и чугуны, основы термической обработки, легированные стали и сплавы, инструментальные стали, цветные металлы и их сплавы. В разделе неметаллических материалов приведены основные свойства дерева, пластмасс, резины, лаков и красок, неорганических материалов.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальностям: 150205 – Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и агрегатов, 151001 – Технология машиностроения, 151002 – Металлообрабатывающие станки и комплексы, 190601 – Автомобили и автомобильное хозяйство, 240801 – Машины и аппараты химических производств.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку:
по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефону: 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 658.51

Ю.И. Дегтярёв, д-р техн. наук, проф.
(ФГБНУ «Аналитический центр», г. Москва)

dan-chip@mail.ru

МОДЕЛИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИНАНСОВЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Рассмотрена возможность формализованного подхода к задаче распределения финансовых ресурсов (денежных потоков), традиционно решаемой неформальными способами. Предложена базовая модель, позволяющая вводить разные критерии оптимальности решений и получать приемлемые практические результаты. Технической основой для этого может служить создание автоматизированных рабочих мест (АРМ) экономистов-аналитиков.

Ключевые слова: распределение ресурсов; формальная модель; критерий оптимальности; программная среда; автоматизированное рабочее место.

The possibility of the formalized approach to the problem of financial resources allocation (cash flow), traditionally solved by informal ways, is considered. A base model, which allows to introduce different criteria for optimal solutions and to receive acceptable practical results is proposed. The technical basis for this is the creation of the automated workplaces (APM) for analysts.

Key words: resource allocation; formal model; optimality criterion; software environment; automatic working place.

В повседневной практике работы управленческих структур (министерств, дирекций фондов, руководства корпораций или банков) периодически возникает необходимость адресного распределения финансовых ресурсов, накопленных или взятых из каких-то источников (например, бюджетных) и предназначаемых организациям-получателям, связанным так или иначе с этими структурами и зависимым от них в плане ресурсного обеспечения (подведомственность, подчинённость, подотчётность и т.п.). В подобных ситуациях обычно применяются неформальные подходы к выбору решений, основанные на изменчивых оценках и соображениях, отражающих опыт прошлого, требования «текущего момента», возможные договорённости и т.п. Это затрудняет понимание получаемых результатов, вызывает недоверие, приводит к ненужным спорам и, в конечном счёте, отвлекает многих участников данного процесса от более продуктивных дел.

Вместе с тем существуют достаточно простые приёмы формализации схем взаимодействия «отправителей» и «получателей» денежных средств в рассматриваемых условиях независимо от того, на каком уровне всё происходит и в какие периоды времени укладывается. Соответствующие модели могут оказаться полезными для практики и способствовать хотя бы частичному устранению негативных моментов, упоминавшихся выше.

Пусть некая вышестоящая инстанция проводит ежегодную операцию распределения имеющегося в её распоряжении годового бюджета B по N организациям (учреждениям) при известных прошлогодних объёмах S_1^-, S_2^-, ..., S_N^- их финансирования и полученных от них же запросах S_1^+, S_2^+, ..., S_N^+ на начинающийся год. По сложившейся традиции (включая объективные причины) заявленные S_j^+ $(j = \overline{1, N})$ превосходят уже реализованные S_j^- $(j = \overline{1, N})$ и, кроме того, вполне ожидаемой оказывается ситуация, когда $\sum_{j=1}^{N} S_j^+ > B$ (поправки на инфляцию, увеличение накладных расходов, рост зарплат и т.д.). Становится очевидным противоречие между желаемым и возможным, сопровождаемое, с одной стороны, многочисленными просьбами «войти в положение», а с другой — строгими призывами соблюдать установленные правила и финансовую дисциплину (в первую очередь — требование $\sum_{j=1}^{N} S_j^+ = B$).

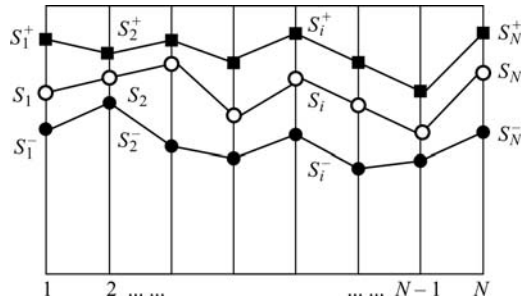

Рис. 1. Общая схема распределения финансовых ресурсов

Приемлемый компромисс можно достигнуть с помощью чёткого выбора критерия K эффективности проводимой операции, построения связанной с ним модели и анализа возникающей распределительной задачи (цель операции как раз и заключается в поиске такого компромисса).

Переходя к формальным рассуждениям, уточняющим рассматриваемую ситуацию, обратимся к схеме, показанной на рис. 1, где на горизонтальной оси отмечены условные номера учреждений-получателей финансовых средств, а вертикальными отрезками обозначены уже встречавшиеся S_j^+, S_j^- $(j = \overline{1, N})$. Естественно, запросы на будущий год (S_j^+) превышают уровни прошлого года (S_j^-), причём расхождения между ними проявляются спонтанно, отражая лишь взгляды и заботы руководителей упомянутых выше учреждений (организаций).

Располагая бюджетом B, вышестоящая инстанция (оперирующая сторона) назначает такие объёмы финансирования S_j, которые, во-первых, жёстко связаны с имеющимся B условием $\sum_{j=1}^{N} S_j = B$ и, во-вторых, приближают тот самый компромисс, к которому нужно стремиться. Самым простым здесь могло бы стать требование пропорционального увеличения всех S_j^- с «коэффициентом роста», равным отношению B к $\sum_{j=1}^{N} S_j^-$. Однако это не устранило бы трудностей, вызванных отсутствием «индивидуального подхода» к получателям денег, и не представило бы интереса для исследователей.

В этом смысле более перспективны оценки разностей $S_j^+ - S_j = \Delta_j$ $(j = \overline{1, N})$, которые указывают на абсолютные «потери» (размеры недофинансирования) каждой организации из-за ограниченности величины B и позволяют выбрать критерии K (т.е. варианты моделей), достаточно хорошо отражающие содержательную сторону исследуемых вопросов. Общая постановка задачи становится понятной и принимает вид:

при известных B, S_j^+, S_j^- $(j = \overline{1, N})$ найти такие $S_j = S_j^*$ $(j = \overline{1, N})$, которые обеспечивают достижение экстремальных (минимальных, максимальных) значений K и отвечают условиям $S_j^+ \geqslant S_j \geqslant S_j^-$ $(j = \overline{1, N})$, $\sum_{j=1}^{N} S_j = B$.

Сформулированная оптимизационная задача допускает различные смысловые интерпретации в зависимости от принятого K, и её решения окажутся оптимальными только для него, поэтому полезно рассмотреть несколько вариантов задания K с их особенностями и возможным применением на практике.

Вариант 1. $K = \sum_{j=1}^{N} \Delta_j$ и ставится требование минимизации этой суммы, что вполне допустимо и объяснимо с экономической точки зрения (сближаются позиции участников процесса, все оказываются примерно в равном положении, отсутствуют предпочтения и т.д.). Однако попытка решить задачу с таким K приводит к малопригодному результату — обнаруживается множество равнозначных (с одинаковым min K), но различающихся по S_1^*, S_2^*, ..., S_N^* решений, и исходная неопределённость в разделении B просто переносится в область числовых оценок.

Вариант 2. $K = \sum_{j=1}^{N} \Delta_j^2$ и требуется минимизировать теперь уже не просто сумму имеющихся Δ_j, что, в принципе, допустимо, но непривычно для экономистов-практиков, представителей управленческих структур, бизнес-аналитиков, поскольку речь идёт о чисто формальном подходе, в котором прослеживается идея известного метода наименьших квадратов, дающего наилучшее приближение отыскиваемых S_1^*, S_2^*, ..., S_N^* к желаемым S_1^+, S_2^+, ..., S_N^+, и остается лишь принять на веру это утверждение без попыток проникнуть в его скрытую экономическую суть.

Вариант 3. В качестве K выбирается наибольшее из значений Δ_j (т.е. $K = \max\{\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_N\}$), сводимое затем к минимуму изменением других Δ_j, что отражает намерение выявить, в первую очередь, «отстающий» (в финансовом отношении) объект и поддержать его за счёт перераспределения оставшихся Δ_j с постепенным их выравниваем до пределов,

определяемых условиями задачи. Здесь используется «минимаксный подход» как символ «справедливости» в отличие от обычно сопровождающих его характеристик «осторожность», «нежелание рисковать» и т.д.

Тему выбора критериев можно продолжить (например, обратившись к разностям $\delta_j = S_j - S_j^-$ и повторить применительно к ним предыдущие рассуждения с некоторыми корректировками знаков min и max), но это не внесло бы ничего принципиально нового в проведённый анализ общей ситуации, отражённой в предложенных моделях распределения бюджета *B*. Подобными критериями должны заниматься, скорее, специалисты в разных областях экономики, организационного управления, инновационной деятельности в составе каких-либо исследовательских групп или во взаимодействии с ними.

Более интересны результаты расчёта конкретных примеров в программной среде разработки Microsoft Visual Studio 2012 для произвольно взятых $N = 10$, $B = 66$ (условные единицы), S_j^- ($j = \overline{1,10}$ — нижние графики на рис. 2 и 3), S_j^+ ($j = \overline{1,10}$ — верхние графики на рис. 2 и 3) с применением метода наименьших квадратов ($K = \sum_{j=1}^{N} \Delta_j^2$, см. рис. 2) и минимаксного подхода ($K = \max\{\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_N\}$, см. рис. 3). Из рисунков видно, что получаемые решения S_j^* ($j = \overline{1,10}$ — средние графики на рис. 2 и 3) отличаются друг от друга в силу различий в

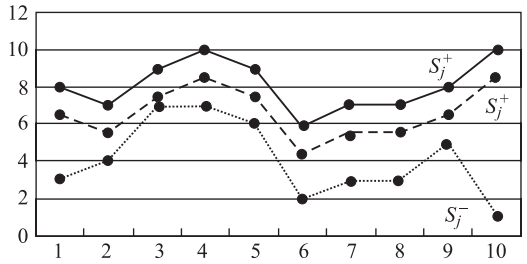

Рис. 2. Решение задачи методом наименьших квадратов

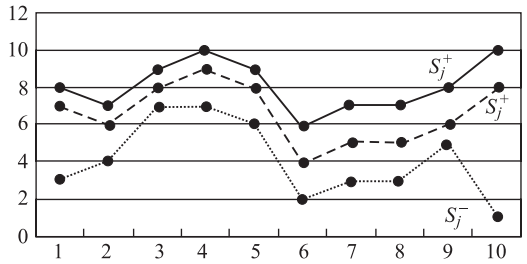

Рис. 3. Решение задачи с использованием минимаксного подхода

критериях *K*, т.е. в разных вариантах общей задачи. Вопрос о том, чему отдать здесь предпочтение, остаётся открытым и становится предметом отдельного обсуждения.

Очевидно, данные примеры могут дополняться многими другими, связанными с изменениям исходных условий проводимого анализа (в частности — с расширением системы ограничений задачи за счёт вводимых приоритетов для некоторых из *N* организаций, назначением каких-то «поправочных коэффициентов», корректированием значений *B* и др.). В итоге должно появиться лучшее понимание всей ситуации в целом и способов её преодоления.

Необходимо заметить, что всё это осуществимо безо всяких сверхусилий посредством создания автоматизированных рабочих мест (АРМ) экономистов-аналитиков, работающих с реальными массивами информации и получающих наборы приемлемых решений, которые могут или использоваться непосредственно, или служить ориентирами для сравнения с решениями, принимаемыми неформально, исходя из сложившейся обстановки.

Разрабатываемые специализированные программные средства средней сложности должны быть ориентированы на исследование задач повышенной размерности (например, с $N = 500$), что не вызовет больших трудностей, так как речь не идёт о режимах реального времени. В любом случае есть все возможности выстроить компактную систему поиска не только формализованных, «модельных» результатов, но и подготовить обоснованные, приемлемые для практики и, главное, объяснимые рекомендации планово-бюджетного характера, отражаемые в распорядительных документах.

Таким образом, проведённый анализ условий централизованного распределения финансовых ресурсов заинтересованным в них получателям позволил найти приемлемые, сбалансированные по заданным параметрам и дополнительным неформальным соображениям варианты, оцениваемые по разным критериям *K* в рамках вполне доступных способов описания рассматриваемого процесса. При всей своей относительной простоте найденные решения представляют серьёзный практический интерес, позволяют лучше понять истоки и методические приёмы исследований, указывают реальные пути автоматизации соответствующих работ и, наконец, упрощают переход к изучению более сложных экономических ситуаций, встречающихся в повседневной управленческой деятельности.