

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 8 (125)

август

2011

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА КИБЕРНЕТИКИ НАН АЗЕРБАЙДЖАНА В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Гулуев Г. А., Саттарова У. Э.** Помехоиндикация изменения динамического состояния производственных объектов 2
- Алиев Т. А., Нусратов О. К., Керимов А. Б., Мамалиева Д. И.** Алгоритм устранения погрешности временного сдвига, возникающего при аналого-цифровом преобразовании многомерных сигналов. 5
- Нусратов О. К., Джафаров П. С., Зейналов Э. Р., Мустафаева А. М., Джафаров С. М.** Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS-моделью для управления манипулятором робота с гибким соединением 10
- Мамедов Ф. И., Асадова Р. Ш., Асадова К. Ф., Асад-заде С. Г.** Двухмерный индуктивный преобразователь для измерения линейных и угловых перемещений. 14
- Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Алиев Я. Г., Ризванов М. Г., Саттаров И. Р.** Интеллектуализированная станция управления станком-качалкой. 17
- Алиев Э. Р.** Комплексная информационная система мониторинга жилых зданий и социально-значимых объектов 21
- Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Саттаров И. Р., Юсифов И. Б.** Комбинированный способ измерения дебита нефтяных скважин 27

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Серебрянный В. В., Рыбальченко Д. Е.** Перспективы развития отечественного роботостроения 31
- Гапонов И. Ю., Подураев Ю. В., Чхо Х.-Ч.** Генерация силы на основе изображения в дистанционно-управляемых микроробототехнических системах 34

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине 42
- Жданов А. В.** Направления развития мехатронных модулей систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца пульсирующего типа. 51

Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Ву Суан Хьюнг.** Контроль и управление безопасным движением транспорта при встречном движении 56
- Заболотнова О. Ю.** Решение задач управления и оценивания при программном развертывании космической тросовой системы. 61
- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Методы построения устойчивых двухкомпонентных инерциальных навигационных систем на основе интерпретации радиальной информации 67
- Contents.** 71

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА КИБЕРНЕТИКИ НАН АЗЕРБАЙДЖАНА В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.216

Т. А. Алиев, академик

Национальной академии наук Азербайджана,
д-р техн. наук, проф., директор,
telmancyber@rambler.ru,

Н. Ф. Мусаева, д-р техн. наук, зав. лаб.,
musana@rambler.ru,

Г. А. Гулуев, канд. техн. наук, директор СКБ,
scb_06@mail.ru,

У. Э. Саттарова, науч. сотр.,
ulker.rzaeva@gmail.com,
Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана

Помехоиндикация изменения динамического состояния производственных объектов

Для индикации начала скрытого периода перехода объекта из нормального в аварийное состояние и определения динамики его развития предлагается технология вычисления оценок, которые при нормальном состоянии равны нулю. В системе мониторинга из них формируется множество информативных признаков, и в процессе эксплуатации объекта по номеру и значению элемента, отличающегося от нуля, определяется место, динамика и характер возникшей неисправности.

Ключевые слова: объект, помеха, зашумленный сигнал, аварийное состояние, информативный признак, помехоиндикатор

Введение

Причины зарождения дефектов на различных объектах — как в живых организмах, так и в технике — являются предметом исследований соответствующих научных направлений. Однако с точки зрения получения информации, методов анализа, мониторинга и диагностики между ними имеется много общего. Во многих случаях на выходах датчиков, установленных на соответствующих объектах, получаются сигналы, которые отражают техническое состояние объектов или состояние их функционирования. Для анализа этих сигналов как носителя информации в различных областях для совершенно отличных друг от друга объектов применяются практически одни и те же информацион-

ные технологии. Они реализовываются с использованием одинаковых современных технических средств. Поэтому, с точки зрения специалиста по измерительно-информационным системам и информационным технологиям, решение задачи мониторинга их состояния существенных отличий не имеет [1, 2].

Постановка задачи

Для надежной и безошибочной индикации начала процесса перехода объекта в аварийное состояние необходимо создание новых эффективных технологий анализа зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$ для случая, когда оценки их характеристик меняются во времени, и помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ является носителем ценной информации [3, 4].

Рассмотрим один из возможных вариантов решения этой задачи. Допустим, что в период времени T_0 до начала процесса зарождения дефекта имеют место классические условия и выполняются соответствующие равенства:

$$W_{T_0}[g(i\Delta t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(g)}} e^{-\frac{(g-m_g)^2}{2D(g)}}, D_\varepsilon \approx 0, \quad (1)$$
$$D_g \approx D_X, R_{gg}(\mu) \approx R_{XX}(\mu), m_g \approx m_X \approx 0, \\ R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx 0, r_{X\varepsilon} \approx 0,$$

где $W_{T_0}[g(i\Delta t)]$ — закон распределения сигнала $g(i\Delta t)$ при нормальном техническом состоянии объекта; D_ε, D_X, D_g — оценки дисперсий помехи, полезного и суммарного сигналов, соответственно; $R_{XX}(\mu), R_{gg}(\mu)$ — оценки корреляционных функций полезного сигнала $X(t)$ и суммарного сигнала $g(t)$; m_g, m_X — математические ожидания суммарного и полезного сигналов; $R_{X\varepsilon}(\mu = 0), r_{X\varepsilon}$ — взаимно корреляционная функция и коэффициент корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой.

Однако в момент T_1 , когда возникает процесс зарождения дефекта и начинается скрытый период изменения технического состояния объекта, условие (1) нарушается, и имеют место следующие неравенства:

$$W_{T_0}[g(t)] \neq W_{T_1}[g(t)], D_\varepsilon \neq 0, D_g \neq D_X, \\ R_{gg}(\mu) \neq R_{XX}(\mu), m_g \neq m_X, R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0, r_{X\varepsilon} \neq 0. \quad (2)$$

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что процесс перехода равенства (1) в неравенство (2) не всегда бывает связан с переходом контролируемых объектов в критическое аварийное состояние. Поэтому наряду с мониторингом момента начала перехода объекта в аварийное состояние также необходимо определить динамику его изменения во времени и прогнозировать возможные результаты развития этого состояния при критических условиях.

Рассмотрим подробно возможные варианты решения соответствующих задач.

Технология мониторинга изменения динамики технического состояния объектов

Из выражений (1) и (2) следует, что при изменении технического состояния объекта нарушаются равенства (1), и при этом, в первую очередь, происходит изменение оценок дисперсии помехи D_ε и полезного сигнала D_X [1, 4], которые можно определить соответственно по выражениям

$$D_\varepsilon \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\dot{g}^2(i\Delta t) + \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+2)\Delta t) - 2\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}((i+1)\Delta t)]; \quad (3)$$

$$D_X = D_g - D_\varepsilon, \quad (4)$$

где $g(i\Delta t)$ — дискретизированные значения сигнала $g(t)$, $i = \overline{1, N}$, Δt — шаг дискретизации, N — число отсчетов; $\dot{g}(i\Delta t) = g(i\Delta t) - m_g$ — центрированные значения дискретизированного сигнала $g(t)$.

Теперь рассмотрим специфику вычисления оценок авто- и взаимокорреляционных функций $R_{\dot{g}_j\dot{g}_j}(\mu)$ и $R_{\dot{g}_j\dot{g}_v}(\mu)$ центрированных сигналов $\dot{g}_j(t)$, $\dot{g}_v(t)$ в периоды времени T_0 и T_1 . Известно, что при вычислении оценок авто- и взаимокорреляционных функций центрированных сигналов $\dot{g}_j(t)$, $\dot{g}_v(t)$ по дискретизированным значениям $\dot{g}_j(i\Delta t)$, $\dot{g}_v(i\Delta t)$, $i = \overline{1, N}$, с увеличением временного сдвига μ между значениями сигналов $\dot{g}_j(i\Delta t)$ и $\dot{g}_j((i+\mu)\Delta t)$, а также между $\dot{g}_j(i\Delta t)$ и $\dot{g}_v((i+\mu)\Delta t)$ наступает момент, когда оценки оказываются равными нулю. Если этот временной сдвиг обозначить μ' , тогда погрешности оценок, полученные по выражениям

$$R_{\dot{g}_j\dot{g}_j}(\mu') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_j(i\Delta t)\dot{g}_j((i+\mu')\Delta t) \approx 0; \quad (5)$$

$$R_{\dot{g}_j\dot{g}_v}(\mu') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{g}_j(i\Delta t)\dot{g}_v((i+\mu')\Delta t) \approx 0, \quad (6)$$

принимают минимальные значения [1, 2].

Это означает, что при стабильном нормальном режиме работы объекта в период времени T_0 всевозможные погрешности, не связанные с изменением технического состояния объекта, оказывают влияние на все оценки $R_{\dot{g}_j\dot{g}_j}(\mu)$ и $R_{\dot{g}_j\dot{g}_v}(\mu)$ при различных значениях μ за исключением оценок $R_{\dot{g}_j\dot{g}_j}(\mu')$ и $R_{\dot{g}_j\dot{g}_v}(\mu')$.

Таким образом, в процессе функционирования системы контроля из характеристик сигналов $g_1(t)$, $g_2(t)$, ..., $g_m(t)$ формируется как комбинация оценок автокорреляционных индикаторов $R_{\dot{g}_1\dot{g}_1}(\mu')$, $R_{\dot{g}_2\dot{g}_2}(\mu')$, ..., $R_{\dot{g}_j\dot{g}_j}(\mu')$, ..., $R_{\dot{g}_m\dot{g}_m}(\mu')$, так и комбинация оценок взаимокорреляционных индикаторов $R_{\dot{g}_1\dot{g}_2}(\mu')$, $R_{\dot{g}_1\dot{g}_3}(\mu')$, ..., $R_{\dot{g}_1\dot{g}_m}(\mu')$; $R_{\dot{g}_2\dot{g}_1}(\mu')$, $R_{\dot{g}_2\dot{g}_3}(\mu')$, ..., $R_{\dot{g}_2\dot{g}_m}(\mu')$; ..., $R_{\dot{g}_m\dot{g}_1}(\mu')$, $R_{\dot{g}_m\dot{g}_2}(\mu')$, ..., $R_{\dot{g}_m\dot{g}_{m-1}}(\mu')$, которые при нормальном техническом состоянии объекта будут равны нулю. В начале скрытого периода перехода объекта в аварийное состояние многие из этих оценок мгновенно будут отличаться от нуля, что позволит использовать их как надежные индикаторы.

Теперь рассмотрим возможность применения для решения вышеуказанных задач оценки взаимокорреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ при нулевом временном сдвиге и коэффициента корреляции $r_{X\varepsilon}$ между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$:

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx \frac{1}{2} [R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 0) - [R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 1) + R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 2) - R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 3)] - R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)]. \quad (7)$$

В этом выражении оценки автокорреляционной функции $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 0)$, $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 1)$, $R_{\dot{g}\dot{g}}(\mu = 2)$ зашумленного сигнала $g(t)$ вычисляются по традиционному алгоритму, а оценка дисперсии $D_\varepsilon = R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ помехи $\varepsilon(t)$ достаточно легко и просто вычисляется по выражению (3). Поэтому формулу (7) можно считать надежной и удобной для практической реализации. Естественно, что после определения $R_{XX}(\mu = 0)$, $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ и D_ε коэффициент корреляции $r_{X\varepsilon}$ можно достаточно легко найти по формуле

$$r_{X\varepsilon} \approx \frac{R_{X\varepsilon}}{\sqrt{R_{XX}(\mu = 0)D_\varepsilon}}. \quad (8)$$

Понятно, что при эксплуатации объекта из характеристик технологических параметров, определяемых по выражениям (7), (8), можно сформировать комбинации оценок как взаимокорреляционных индикаторов $R_{X_1\varepsilon_1}(\mu = 0)$, $R_{X_2\varepsilon_2}(\mu = 0)$, ..., $R_{X_m\varepsilon_m}(\mu = 0)$, так и коэффициентов корреляции $r_{X_1\varepsilon_1}$, $r_{X_2\varepsilon_2}$, $r_{X_3\varepsilon_3}$, ..., $r_{X_m\varepsilon_m}$, которые при переходе объекта в аварийное состояние будут отличаться от нуля.

Идентификация динамики перехода сложных объектов из нормального технического состояния в аварийное

В объектах контроля зарождение дефекта во многих случаях способствует скрытому переходу объектов из нормального технического состояния в аварийное. Поэтому в системах контроля наряду с мониторингом и индикацией начала зарождения дефекта также целесообразно решать задачи идентификации их технического состояния. Для этой цели, прежде всего, требуется формирование соответствующих корреляционных матриц, так как в общем случае решение многочисленных важнейших задач идентификации как статики, так и динамики сводится к численному решению матричных корреляционных уравнений типа

$$R_{\dot{X}\dot{X}}(0)B = R_{\dot{X}\dot{Y}}(0); \quad (9)$$

$$R_{\dot{X}\dot{Y}} = R_{\dot{X}\dot{X}}(\mu)W(\mu), \mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t, \quad (10)$$

где B — вектор-столбец коэффициентов уравнения статики;

$$\begin{cases} R_{\dot{X}\dot{X}}(0) = \|R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(0)\|, i, j = \overline{1, m}, \\ R_{\dot{X}\dot{Y}}(0) = \|R_{\dot{X}_i\dot{Y}}(0)\|, i = \overline{1, m}; \end{cases}$$

$\|R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(0)\|$ — матрица оценок авто- и взаимокорреляционных функций $R_{\dot{X}_i\dot{X}_i}(0)$, $R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(0)$ при временном сдвиге $\mu = 0$ центрированных входных сигналов $\dot{X}_i(t) = X_i(t) - m_{X_i}$; $\|R_{\dot{X}_i\dot{Y}}(0)\|$ — матрица-столбец оценок взаимокорреляционных функций $R_{\dot{X}_i\dot{Y}}(0)$ при временном сдвиге $\mu = 0$ между центрированными входными $\dot{X}_i(t)$ и выходным $\dot{Y}(t) = Y(t) - m_Y$ сигналами; m_{X_i} и m_Y — математические ожидания соответственно сигналов $X_i(t)$ и $Y(t)$; $W(\mu)$ — вектор-столбец импульсных переходных функций [1, 4–6];

$$\begin{aligned} R_{\dot{X}\dot{X}}(\mu) &= \\ &= \begin{vmatrix} R_{\dot{X}\dot{X}}(0) & R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] \\ R_{\dot{X}\dot{X}}(\Delta t) & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-1)\Delta t] & R_{\dot{X}\dot{X}}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{\dot{X}\dot{X}}(0) \end{vmatrix}; \\ R_{\dot{X}\dot{Y}}(\mu) &= [R_{\dot{X}\dot{Y}}(0) \ R_{\dot{X}\dot{Y}}(\Delta t) \ \dots \ R_{\dot{X}\dot{Y}}[(N-1)\Delta t]]^T, \\ W(\mu) &= [W(0) \ W(\Delta t) \ \dots \ W((N-1)\Delta t)]^T. \end{aligned}$$

Однако для реальных сложных объектов решение задачи идентификации по уравнениям (9), (10) во многих случаях оказывается сложным, трудоемким, к тому же достигнуть необходимой адекватности модели часто не удается. Поэтому применение такого подхода при идентификации динамики перехода объекта в аварийное состояние во многих случаях оказывается неоправданным. Для успешного решения задач как индикации, так и иденти-

фикации начала перехода объектов из нормального состояния в аварийное предлагается легко реализуемая технология. Она позволяет с достаточной степенью надежности получить полную картину происходящих процессов в начальный момент временного интервала T_1 , когда объект переходит в аварийное состояние. Для этого предусматривается применение оценок технологических параметров, полученных по выражениям (3)–(8).

Допустим, что техническое состояние объекта отражается в технологических параметрах $g_1(i\Delta t)$, $g_2(i\Delta t)$, ..., $g_j(i\Delta t)$, ..., $g_m(i\Delta t)$. Тогда путем определения соответствующих оценок корреляционных индикаторов по формулам (5), (6) можно сформировать соответствующую матрицу информативных признаков:

$$V_g = \begin{vmatrix} R_{g_1g_1}(\mu') & R_{g_1g_2}(\mu') & R_{g_1g_3}(\mu') & \dots & R_{g_1g_j}(\mu') & \dots & R_{g_1g_m}(\mu') \\ R_{g_2g_1}(\mu') & R_{g_2g_2}(\mu') & R_{g_2g_3}(\mu') & \dots & R_{g_2g_j}(\mu') & \dots & R_{g_2g_m}(\mu') \\ R_{g_3g_1}(\mu') & R_{g_3g_2}(\mu') & R_{g_3g_3}(\mu') & \dots & R_{g_3g_j}(\mu') & \dots & R_{g_3g_m}(\mu') \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{g_jg_1}(\mu') & R_{g_jg_2}(\mu') & R_{g_jg_3}(\mu') & \dots & R_{g_jg_j}(\mu') & \dots & R_{g_jg_m}(\mu') \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{g_mg_1}(\mu') & R_{g_mg_2}(\mu') & R_{g_mg_3}(\mu') & \dots & R_{g_mg_j}(\mu') & \dots & R_{g_mg_m}(\mu') \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Аналогично путем распараллеливания вычисления соответствующих оценок дисперсии помехи на основе анализа всех технологических параметров $g_1(i\Delta t)$, $g_2(i\Delta t)$, ..., $g_j(i\Delta t)$, ..., $g_m(i\Delta t)$ по формуле (3) также легко можно сформировать вектор информативных признаков технического состояния контролируемых объектов в виде

$$V_\varepsilon = [D_{\varepsilon_1} \ D_{\varepsilon_2} \ D_{\varepsilon_3} \ \dots \ D_{\varepsilon_j} \ \dots \ D_{\varepsilon_m}]. \quad (12)$$

Кроме этого, для повышения достоверности результатов мониторинга начала скрытого периода перехода объекта в аварийное состояние можно сформировать матрицу информативных признаков по выражениям (7), (8). В результате матрица из оценок взаимно корреляционных функций и коэффициентов корреляции между полезным сигналом и помехой соответствующих технологических параметров можно представить в виде

$$V_{X\varepsilon} = \begin{vmatrix} R_{X_{\varepsilon_1}}(\mu=0) & R_{X_{\varepsilon_2}}(\mu=0) & R_{X_{\varepsilon_3}}(\mu=0) & \dots & R_{X_{\varepsilon_j}}(\mu=0) & \dots & R_{X_{\varepsilon_m}}(\mu=0) \\ r_{X_{\varepsilon_1}} & r_{X_{\varepsilon_2}} & r_{X_{\varepsilon_3}} & \dots & r_{X_{\varepsilon_j}} & \dots & r_{X_{\varepsilon_m}} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Очевидно, что когда объект находится в нормальном техническом состоянии, т. е. когда все технологические параметры находятся во временном интервале T_0 , все элементы матриц информативных признаков V_g , V_ε , $V_{X\varepsilon}$ будут находиться в нулевом состоянии. При этом по номеру матрицы и по номеру информативного признака, который отличен от нуля, можно определить, т. е. идентифицировать место и характер неисправности, приводящей к переходу объекта из нормального в аварийное состояние.

Заключение

При функционировании реальных систем контроля и управления на определенном временном интервале по отклонению от нуля оценок элементов матриц можно оценить динамику развития аварийного состояния. При этом стабильность отклонения от нуля особенно взаимокорреляционных функций и коэффициента корреляции между полезным сигналом и помехой технологических параметров $g_1(t)$, $g_2(t)$, $g_3(t)$, ..., $g_j(t)$, ..., $g_m(t)$ можно принять как показатель наличия достаточности ресурсов работоспособности объекта. Сочетание трех информативных матриц (11), (12), (13) позволяет многократно повысить надежность результатов мониторинга.

Список литературы

1. **Aliev T.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin. London: Springer, 2007. 235 p.
2. **Collacott R. A.** Structural integrity monitoring. Kluwer, 1985, 474 p.
3. **Bendat, Julius S. and Allan G.** Piersol, Random Data, Analysis & Measurement Procedures. Wiley-Interscience, 2000.
4. **Telman Aliev.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003. 199 p.
5. **Musaeva N. F.** Methodology of calculating robustness as an estimator of the statistical characteristics of a noisy signal // Automatic Control and Computer Sciences, Allerton Press, Inc., New York, 2005. V. 39. N 5. P. 53–62.
6. **Musaeva N. F.** Robust correlation coefficients as initial data for solving a problem of confluent analysis // Automatic Control and Computer Sciences. Allerton Press. Inc., New York, 2007. N 2. P. 76–87.

УДК 519.216

Т. А. Алиев, академик

Национальной академии наук Азербайджана,
д-р техн. наук, проф., директор,
telmancyber@rambler.ru,

О. К. Нусратов, д-р техн. наук, зам. директора,

А. Б. Керимов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

Д. И. Масталиева, науч. сотр.,

Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана

Алгоритм устранения погрешности временного сдвига, возникающего при аналого-цифровом преобразовании многомерных сигналов

Анализируется влияние на точность оценки взаимокорреляционных функций зашумленных сигналов временного сдвига, образуемого между отсчетами при аналого-цифровом преобразовании многомерных случайных сигналов. Для его устранения предлагаются алгоритм и программные средства, реализуемые на базе процедуры интерполирования и экстраполирования. Показано, что при этом уменьшается погрешность искомых оценок. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: сигнал, аналого-цифровое преобразование, временной сдвиг, корреляционная функция, интерполяция, экстраполяция

Введение. При решении задач статистической идентификации для многомерных случайных входных $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, и выходного $Y(t)$ сигналов возникает необходимость в аналого-цифровом преобразовании десятков, а иногда и большего числа зашумленных аналоговых сигналов. При этом, как правило, в большинстве случаев аналого-цифровое

преобразование осуществляется с помощью устройств, в которых процесс кодирования между выходами датчиков осуществляется поочередно-последовательно, в результате чего между цифровыми отсчетами сигналов

$$X_1(k\Delta t), X_2(k\Delta t), \dots, X_n(k\Delta t), Y(k\Delta t), k = \overline{1, N}, \quad (1)$$

возникает временной сдвиг, равный времени преобразования Δt_{pr} аналого-цифрового преобразователя. Вследствие этого вместо последовательности (1) получается последовательность

$$X_1(k\Delta t), X_2(k\Delta t + \Delta t_{pr}), \dots, X_n(k\Delta t + (n-1)\Delta t_{pr}), \\ Y(k\Delta t + n\Delta t_{pr}), k = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Временной сдвиг Δt_{pr} , иногда именуемый "косым сечением" [1–3], отрицательно отражается на оценках сигналов при их обработке, поскольку отсутствие привязки получаемых данных к одному моменту времени может быть причиной погрешностей при их совместной обработке, в частности, при решении задач идентификации статистики, динамики, распознавания, диагностики и т. д. Во многих случаях временной сдвиг оказывается нежелательным.

Для устранения временного сдвига имеется ряд аппаратных решений. Например, иногда для устранения эффекта временного сдвига используются устройства выборки/хранения (УВХ). Некоторые аналого-цифровые преобразователи структурно содержат данные встроенные устройства. Это характерно, например, для параллельно-последовательных аналого-цифровых преобразователей [4].

В работе [1] предлагается другое решение этой проблемы, согласно которому определение отсчетов всех каналов осуществляется синхронно, и записываются мини-коды сигналов, по которым затем определяются их полные коды.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается один из возможных вариантов устранения временного сдвига с применением процедуры интерполирования и экстраполирования между соседними значениями отсчетов $X_1(k\Delta t)$ и $X_1((k+1)\Delta t)$, $X_2(k\Delta t + \Delta t_{pr})$ и $X_2((k+1)\Delta t + \Delta t_{pr})$, ..., $X_n(k\Delta t + (n-1)\Delta t_{pr})$ и $X_n((k+1)\Delta t + (n-1)\Delta t_{pr})$, $Y(k\Delta t + n\Delta t_{pr})$ и $Y((k+1)\Delta t + n\Delta t_{pr})$, $k = \overline{1, N}$. Процедура реализуется с помощью программных средств.

Источники погрешностей корреляционных функций, обусловленных временным сдвигом между отсчетами сигналов. Рассмотрим трудности, которые возникают при вычислении оценок корреляционной функции в результате появления временного сдвига.

Известно, что оценки автокорреляционной функции $R_{X_1 X_1}(\tau)$ полезного сигнала $X_1(t)$ традиционно вычисляются по формуле [5]

$$\begin{aligned} R_{X_1 X_1}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}_1(t) \dot{X}_1(t + \tau) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (X_1(t) - m_{X_1})(X_1(t + \tau) - m_{X_1}) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) X_1(t + \tau) dt - m_{X_1} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) dt - \\ &\quad - m_{X_1} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t + \tau) dt + m_{X_1}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{X}_1(t) = X_1(t) - m_{X_1}$ — центрированный сигнал,

$m_{X_1} = \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) dt$ — математическое ожидание сигнала $X_1(t)$.

При традиционном подходе предполагается, что исследуемые процессы $X_i(t)$ являются стационарными эргодическими и подчиняются нормальному закону распределения. Тогда справедливы следующие равенства:

$$\frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t + \tau) dt \approx m_{X_1}, \quad (4)$$

и выражение (3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} R_{X_1 X_1}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}_1(t) \dot{X}_1(t + \tau) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) X_1(t + \tau) dt - m_{X_1}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичные выражения можно написать и для остальных сигналов, например, для $X_n(t)$:

$$\begin{aligned} R_{X_n X_n}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}_n(t) \dot{X}_n(t + \tau) dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T X_n(t) X_n(t + \tau) dt - m_{X_n}^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\dot{X}_n(t) = X_n(t) - m_{X_n}$, $m_{X_n} = \frac{1}{T} \int_0^T X_n(t) dt$ — математические ожидания сигнала $X_n(t)$.

Аналогично можно написать формулы для вычисления оценок взаимокорреляционных функций $R_{X_1 X_2}(\tau)$, $R_{X_1 X_3}(\tau)$, ..., $R_{X_1 X_n}(\tau)$, $R_{X_2 X_1}(\tau)$, $R_{X_2 X_3}(\tau)$, ..., $R_{X_2 X_n}(\tau)$, ..., $R_{X_n X_1}(\tau)$, $R_{X_n X_2}(\tau)$, ..., $R_{X_n X_{n-1}}(\tau)$, $R_{X_1 Y}(\tau)$, $R_{X_2 Y}(\tau)$, ..., $R_{X_n Y}(\tau)$.

Однако формулы (3)–(6) имеют аналитический вид и непригодны для практического применения в случае, когда сигналы поступают от соответствующих датчиков и подвергаются аналого-цифровому преобразованию. Поэтому интегралы в выражениях (3)–(6) следует заменить соответствующими суммами. Разделим промежуток времени T в выражениях (3)–(6) на N весьма малых интервалов Δt , т. е. предположим, что $T = N\Delta t$, так, чтобы функции $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_n(t)$, $Y(t)$ мало изменялись на протяжении интервала Δt . Придадим t и τ дискретные значения, т. е. предположим, что $t = k\Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$, $\tau = \mu\Delta t$, $\mu = 0, 1, 2, \dots$. При этом следует иметь в виду, что шаг дискретизации Δt сигналов не должен быть меньше времени преобразования сигнала Δt_{pr} в $n+1$ раз, где n — число каналов, необходимое для преобразования n входных сигналов $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_n(t)$ и одного выходного сигнала $Y(t)$, т. е. должно выполняться соотношение

$$\Delta t \geq (n+1)\Delta t_{pr}. \quad (7)$$

При сделанных допущениях интегралы в выражениях (3)–(6) можно заменить суммами:

$$\begin{aligned} R_{X_1 X_1}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{X}_1(i\Delta t) \dot{X}_1((i+\mu)\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_1(i\Delta t) X_1((i+\mu)\Delta t) - m_{X_1}^2, \end{aligned} \quad (8)$$

...

$$\begin{aligned} R_{X_n X_n}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{X}_n(i\Delta t) \dot{X}_n((i+\mu)\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_n(i\Delta t) X_n((i+\mu)\Delta t) - m_{X_n}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично можно написать формулы для вычисления оценок взаимокорреляционных функций.

Однако эти выражения справедливы для случая, когда аналого-цифровое преобразование различных параметров $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_n(t)$, $Y(t)$ осуществляется синхронно и оцифрованные сигналы получаются в виде последовательности (1), которая поступает в измерительную систему для обработки. В случае же, когда аналого-цифровое преобразование осуществляется поочередно-последовательно, в результате чего образовывается временной сдвиг Δt_{pr} , необходимо использовать средства для его устранения.

Тогда очевидно, что первой цифровой обработке подвергается сигнал $X_1(t)$. Это происходит в моменты времени $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$. Поэтому для сигнала $X_1(t)$ получается цифровая последовательность

$$X_1(0), X_1(\Delta t), X_1(2\Delta t), \dots, X_1(N\Delta t). \quad (10)$$

Очевидно, что в этом случае формула (7) вычисления автокорреляционной функции сигнала $X_1(t)$ остается неизменной.

Вторым цифровой обработке подвергается сигнал $X_2(t)$. Это происходит через время Δt_{pr} после преобразования сигнала $X_1(t)$, т. е. в моменты времени $t = 0 + \Delta t_{pr}, \Delta t + \Delta t_{pr}, 2\Delta t + \Delta t_{pr}, \dots, N\Delta t + \Delta t_{pr}$. Поэтому для сигнала $X_2(t)$ получается последовательность дискретных значений

$$X_2(\Delta t_{pr}), X_2(\Delta t + \Delta t_{pr}), X_2(2\Delta t + \Delta t_{pr}), \dots, X_2(N\Delta t + \Delta t_{pr}). \quad (11)$$

Очевидно, что в этом случае формула вычисления его автокорреляционной функции примет вид

$$R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(\mu)_{pr} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{X}_2(i\Delta t + \Delta t_{pr}) \dot{X}_2((i + \mu)\Delta t + \Delta t_{pr}) = R_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(\mu) + \Lambda_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(\mu)_{pr},$$

где $\Lambda_{\dot{X}_2\dot{X}_2}(\mu)_{pr}$ — погрешность оценки автокорреляционной функции сигнала $X_2(t)$ в результате образования временного сдвига.

Аналогичные выражения получаются для всех остальных сигналов. Таким образом, n -й цифровой обработке подвергается сигнал $X_n(t)$. Это происходит через время $(n - 1)\Delta t_{pr}$ после преобразования сигнала $X_1(t)$, т. е. в моменты времени $t = (n - 1)\Delta t_{pr}, \Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}, 2\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}, \dots, N\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}$. Поэтому для сигнала $X_n(t)$ получается последовательность дискретных значений в виде

$$X_n((n - 1)\Delta t_{pr}), X_n(\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}), X_n(2\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}), \dots, X_n(N\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}). \quad (12)$$

Очевидно, что в этом случае формула (9) вычисления его автокорреляционной функции преобразуется следующим образом:

$$R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(\mu)_{pr} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{X}_n(k\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}) \times \dot{X}_n((k + \mu)\Delta t + (n - 1)\Delta t_{pr}) = R_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(\mu) + \Lambda_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(\mu)_{pr}$$

где $\Lambda_{\dot{X}_n\dot{X}_n}(\mu)_{pr}$ — погрешность оценки автокорреляционной функции сигнала $X_n(t)$ в результате образования временного сдвига.

Последним цифровой обработке подвергается сигнал $Y(t)$. Это происходит через время $n\Delta t_{pr}$ после преобразования сигнала $X_1(t)$, т. е. в моменты времени $t = n\Delta t_{pr}, \Delta t + n\Delta t_{pr}, 2\Delta t + n\Delta t_{pr}, \dots, N\Delta t + n\Delta t_{pr}$. Поэтому для сигнала $Y(t)$ получается последовательность дискретных значений

$$Y(n\Delta t_{pr}), Y(\Delta t + n\Delta t_{pr}), Y(2\Delta t + n\Delta t_{pr}), \dots, Y(N\Delta t + n\Delta t_{pr}). \quad (13)$$

Очевидно, что в этом случае формула вычисления его автокорреляционной функции имеет вид

$$R_{\dot{Y}\dot{Y}}(\mu)_{pr} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \dot{Y}(k\Delta t + n\Delta t_{pr}) \times \dot{Y}((k + \mu)\Delta t + n\Delta t_{pr}) = R_{\dot{Y}\dot{Y}}(\mu) + \Lambda_{\dot{Y}\dot{Y}}(\mu)_{pr},$$

где $\Lambda_{\dot{Y}\dot{Y}}(\mu)_{pr}$ — погрешность оценки автокорреляционной функции сигнала $Y(t)$ в результате образования временного сдвига.

При этом формулы вычисления оценок взаимокорреляционных функций с учетом полученных в результате временного сдвига последовательностей (10)–(13) можно представить в аналогичном виде.

Таким образом, анализ показывает, что оценки корреляционных функций, вычисленные для поочередно-последовательных дискретизированных аналоговых сигналов, в результате появления временного сдвига существенно отличаются от оценок, полученных для синхронно дискретизированных аналоговых сигналов. Это означает, что традиционно принятые в литературе [5] равенства

$$R_{\dot{X}_i\dot{X}_i}(\mu) = R_{\dot{X}_i\dot{X}_i}(\mu)_{pr}, \quad R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(\mu) = R_{\dot{X}_i\dot{X}_j}(\mu)_{pr}, \\ R_{\dot{Y}\dot{X}_i}(\mu) = R_{\dot{Y}\dot{X}_i}(\mu)_{pr}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (14)$$

не выполняются.

Для обеспечения равенств (14) в данной работе использованы методы интерполяции и экстраполяции, реализуемые с помощью программных средств.

Применение процедуры интерполяции и экстраполяции для устранения влияния временных сдвигов. В общем случае для функции $y = f(x)$ требуется найти такое приближение $y = \varphi(x)$, чтобы $f(x_i) = \varphi(x_i)$ в точках $x = x_i$, а в остальных точках отрезка $[a, b]$ значения функций $f(x)$ и $\varphi(x)$ были бы близкими. При малом числе экспериментальных точек для интерполяции можно использовать интерполяционные полиномы. Однако при большом числе экспериментальных точек интерполяционные полиномы становятся практически непригодными, так как степень интерполяционного полинома лишь на единицу меньше числа экспериментальных точек. Можно отрезок, на котором определена функция, разбить на участки, содержащие малое число экспе-

риментальных точек, и для каждого из них построить интерполяционные полиномы. Однако в этом случае аппроксимирующая функция будет иметь точки, где производная не является непрерывной. Кубические сплайны [6, 7] лишены этого недостатка, потому что имеют непрерывные первые и вторые производные. Кубический сплайн задается значениями функции в узлах и значениями производных на границе отрезка интерполяции (либо первых, либо вторых производных). Если известно точное значение первой производной на обеих границах, то такой сплайн называют фундаментальным, погрешность интерполяции равна $O(h^4)$. Если значение производных на границе неизвестно, то можно задать так называемые естественные граничные условия $\varphi''(a) = 0$; $\varphi''(b) = 0$ и получить естественный сплайн. Погрешность интерполяции естественным сплайном составляет $O(h^2)$. Максимум погрешности наблюдается в окрестностях граничных узлов, во внутренних узлах точность интерполяции значительно выше. Итак, естественный интерполяционный кубический сплайн определяется следующим образом.

Пусть некоторая функция $f(x)$ задана на отрезке $[a, b]$, разбитом на части $[x_{i-1}, x_i]$, $a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b$. Естественным кубическим сплайном называется функция $\varphi(x)$, которая:

- 1) на каждом отрезке $[x_{i-1}, x_i]$ является многочленом степени не выше третьей;
- 2) имеет непрерывные первую и вторую производные на всем отрезке $[a, b]$;
- 3) в точках x_i выполняется равенство $\varphi(x_i) = f(x_i)$, т. е. сплайн $\varphi(x)$ интерполирует функцию f в точках x_i ;
- 4) удовлетворяет граничным условиям: $\varphi''(a) = 0 = \varphi''(b)$.

Применим кубический сплайн для восстановления сигнала, подвергнутого сдвигу. Любой сигнал может быть представлен суммой гармонических функций. Поэтому для моделирования реальных сигналов часто используют модель в виде Фурье-представления [8, 9]. Возьмем сигнал

$$s(t) = 100 + 5\sin t + 20\cos(2,1t + 0,2) + \cos(2,5t) + 10\sin(0,2t - 1,1),$$

заданный на отрезке $[0; 20\pi]$, и дискретизируем его в виде 500 отсчетов с шагом $\Delta t = 0,1257$ (на рис. 1 показаны первые 250 отсчетов). Шаг Δt выбран в соответствии с теоремой Котельникова.

Если сигнал $s(t)$ задан в дискретных точках $s_i = s(t_i)$, t_i , $i = 1, \dots, 500$, его сдвинутой версией будет сигнал, заданный в дискретных точках $t_i + \Delta t_{\text{сдвиг}}$, $i = 1, \dots, 500$, где $\Delta t_{\text{сдвиг}}$ — шаг сдвига. Задача нахождения (восстановления) сигнала $s(t)$ в точках t_i , $i = 1, \dots, 500$, по его известным значениям в сдвинутых точках $t_i + \Delta t_{\text{сдвиг}}$, $i = 1, \dots, 500$, является одновременно и задачей экстраполяции и задачей интерполяции.

Проведем девять сдвигов сигнала $s(t)$ с шагом $\Delta t_{\text{сдвиг}} = 0,0114$, шаг $\Delta t_{\text{сдвиг}}$ выбирается так, чтобы выполнялось условие (7), в данном случае

$0,1257 > 9 \cdot 0,0114$. Мы получим девять его сдвинутых версий. Теперь, с помощью экстраполяции и интерполяции для каждой из этих девяти версий восстановим исходный сигнал. Вычислим ошибки экстраполяции и интерполяции. Обозначим $v(i, k)$, $k = 1, \dots, 500$, i -ю сдвинутую, а $e(i, k)$, $k = 1, \dots, 500$, — i -ю экстраполированную и интерполированную версию сигнала $s(t)$. Максимальная ошибка d_i , $i = 1, \dots, 9$, при i -м сдвиге для каждой из этих девяти сдвинутых версий вычисляется по формуле

$$d_i = \max_{k \in N} (s_k - v(i, k)),$$

где N — число отсчетов. Результаты вычислений для 500 отсчетов приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, максимальная ошибка для девятой сдвинутой версии — наибольшая, и она объясняется тем, что эта версия подвергается наибольшему сдвигу, равному $9\Delta t_{\text{сдвиг}}$. Теперь, используя сплайн-функции, с помощью процедуры экстраполяции и интерполяции восстановим сигнал $s(t)$ из каждой сдвинутой версии и вычислим ошибки.

Максимальная ошибка r_i , $i = 1, \dots, 9$, для каждой восстановленной версии исходного сигнала вычисляется по формуле

$$r_i = \max_{k \in N} (s_k - e(i, k)),$$

где N — число отсчетов. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что максимальная ошибка для девятой восстановленной версии равна 0,0449, что можно считать удовлетворительным результатом.

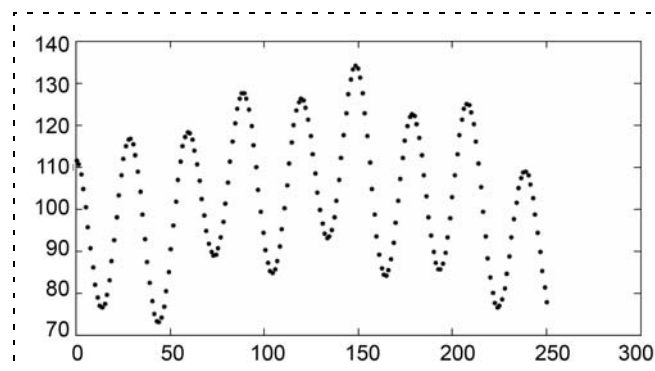


Рис. 1. Отсчеты исходного сигнала

Таблица 1

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
0,5730	1,1468	1,7212	2,2957	2,8701	3,4441	4,0174	4,5897	5,1606

Таблица 2

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9
0,0019	0,0043	0,0074	0,0114	0,0161	0,0217	0,0284	0,0361	0,0449

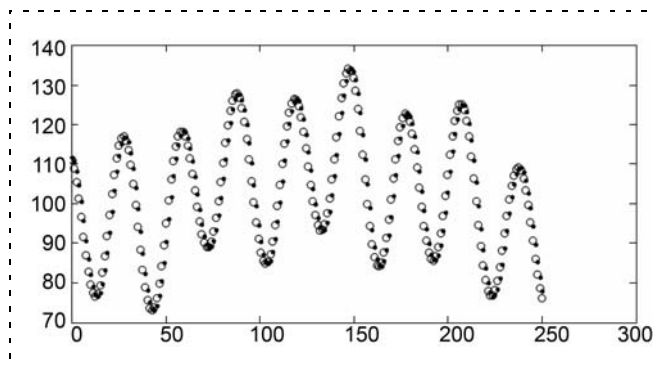


Рис. 2. Отсчеты исходного сигнала и его девятой сдвинутой версии

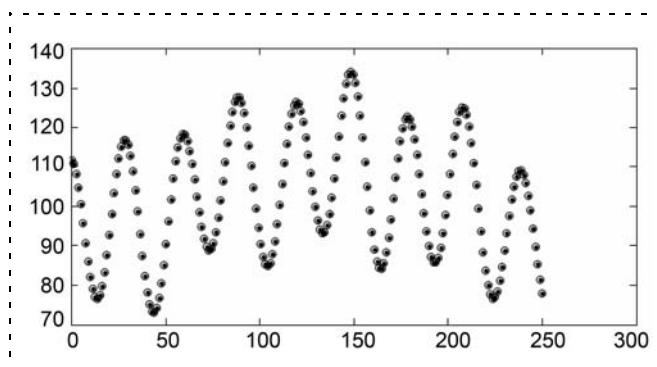


Рис. 3. Отсчеты исходного сигнала и его девятой экстраполированной и интерполированной версии

На рис. 2 в одной координатной системе показаны исходный сигнал (обычными точками) и его девятая сдвинутая версия (кружками). Отчетливо видно как центры кружков отклоняются от точек исходного сигнала.

На рис. 3 в одной координатной системе показаны исходный сигнал (обычными точками) и его восстановленная версия (кружками), полученная из его девятой сдвинутой версии. Отчетливо видно, как центры кружков совпадают с точками исходного сигнала.

Теперь проведем вычисления с $L = 25, 50, 100$ сдвигами и вычислим максимальную ошибку D для всех сдвинутых версий исходного сигнала, т. е. найдем

$$D = \max_{i \in L} r_i = \max_{i \in L} (\max_{k \in N} (s_k - e(i, k))),$$

где L — число сдвигов, N — число отсчетов. Для $L = 25$ получим $D = 0,0569$, а для $L = 50$ получим $D = 0,0612$. Вычисления, выполненные для $L = 100$, дают результат $D = 0,0636$. Следовательно, применение экстраполяции и интерполяции для восстановления исходного сигнала, подвергнутого сдвигу, дает удовлетворительный результат и может быть применен при последовательном преобразовании достаточно большого числа аналоговых сигналов в цифровые сигналы для устранения временного сдвига.

Результаты вычислительных экспериментов. Для устранения временного сдвига как источника погрешностей корреляционных матриц были проведены вычислительные эксперименты с использованием пакета прикладных программ MATLAB. Вычислительные эксперименты проводились следующим образом. Формировали случайные сигналы $X_1(t), X_2(t), X_3(t), X_4(t), X_5(t), X_6(t), X_7(t), X_8(t)$.

Входные сигналы были сформированы в виде суммы гармонических колебаний:

- 1) $X_1(t) = 100 + 5\sin t + 20\cos(2,1t + 0,2) + \cos(2,5t) + 10\sin(0,2t - 1,1);$
- 2) $X_2(t) = 70 + \cos(2t - 0,5) + 20\sin(1,5t - 2,2) + 15\cos(t + 2,2) + \sin(2t + 2,1);$
- 3) $X_3(t) = 80 + \sin(1,5t + 1,2) + 10\sin t + 5\cos(2,5t + 2,1) + \sin(2t) + 10\sin(0,2t + 3,2);$
- 4) $X_4(t) = 60 + \cos(t + 2,2) + 10\sin(3t - 1,2) + 15\cos(1,5t + 1,1) + \cos(2t - 1,2) + 20\sin(1,2t - 1,2);$
- 5) $X_5(t) = 90 + 10\sin t + 20\cos(2,2t + 0,2) + 25\cos(0,5t + 1,1) + 10\sin(2t - 1,1) + 15\cos t;$
- 6) $X_6(t) = 50 + \cos(t - 0,5) + 10\sin(0,5t - 1,2) + 5\cos(t + 1,2) + \sin(2t) + 20\sin(2,2t + 5,3);$
- 7) $X_7(t) = 40 + 15\sin(0,5t + 1,2) + 10\sin(t + 3) + 5\cos(0,5t - 2,1) + \sin(2t) + 20\sin(0,2t + 3,2);$
- 8) $X_8(t) = 30 + \sin t + 30(3,2t - 2,2) + 10\cos(0,5t + 2,1) + \sin(2,1t - 0,2) + \cos(1,2t - 1,2);$
- 9) $X_9(t) = 70 + 10\cos(2t) + 10\cos(1,2t + 1,2) + 20\sin(1,5 + 2,1) + 20\cos(2t - 1,1) + 15\cos t.$

Выбран шаг дискретизации $\Delta t = \pi/200$ и шаг преобразования $\Delta t_{pr} = 0,0114$.

В первом варианте экспериментов для всех сигналов вычислены авто- и взаимокорреляционные функции по формулам (8)–(9), т. е. аналого-цифровое преобразование различных параметров $X_1(t), X_2(t), X_3(t), X_4(t), X_5(t), X_6(t), X_7(t), X_8(t), X_9(t), Y(t)$ осуществляется синхронно, и оцифрованные сигналы получаются в виде последовательности (1).

В результате эксперимента были получены оценки взаимо- и автокорреляционных функций.

Во втором варианте экспериментов аналого-цифровое преобразование осуществляется поочередно-последовательно. В этом случае приходится проводить цифровую обработку последовательности сигналов (2), т. е. все сигналы, кроме сигнала $X_1(t)$, оказываются сдвинутыми на шаг преобразования.

В результате эксперимента были получены оценки взаимо- и автокорреляционных функций для сдвинутых сигналов.

В третьем варианте экспериментов с помощью интерполяции и экстраполяции были восстановлены сигналы и вычислены оценки взаимо- и автокорреляционных функций.

Результаты этих экспериментов показали, что при образовании временного сдвига Δt_{pr} оценки взаимо- и автокорреляционных функций изменяются. После восстановления сигналов с помощью интерполяции и экстраполяции были вычислены оценки взаимо- и автокорреляционных функций. Эти вы-

числения показали, что с помощью интерполяции и экстраполяции сигнал восстанавливается с точностью до 10^{-4} .

Заключение. Таким образом, предлагаемый подход для устранения нарушения синхронности кодирования многомерных сигналов с применением процедуры интерполяции и экстраполяции обеспечивает достаточную точность восстановления сигналов. Следовательно, его можно использовать при решении задач статистической идентификации для многомерных случайных сигналов без применения специальной аппаратуры, где аналого-цифровое преобразование осуществляется поочередно-последовательно. При этом улучшаются оценки взаимно- и автокорреляционных функций.

Список литературы

1. Алиев Т. А. Экспериментальный анализ. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
2. Aliiev T. A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003. 199 p.
3. Aliiev T. A. Digital Noise Monitoring of Defect Origin. Springer, London, 2007. 223 p.
4. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов. М.: Мир, 1999. 559 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
6. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 1998. 575 с.
7. Brezinski C. Numerical Analysis 2000 // Interpolation and Extrapolation. 2000. V. 2. 355 p.
8. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Пер. с англ. М.: Бином-Пресс, 2006. 656 с.
9. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.

УДК 62.50/519.7:816

О. К. Нусратов¹,

д-р техн. наук, проф., зам. директора,
cyber@cyber.ab.az,

П. С. Джафаров¹, аспирант,

Э. Р. Зейналов², канд. техн. наук, науч. сотр.,

А. М. Мустафаева¹, аспирант,

С. М. Джафаров², д-р техн. наук, проф.,

¹ Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана,

² Азербайджанская государственная
нефтяная академия

Аналитический метод синтеза регулятора с нечеткой TS-моделью для управления манипулятором робота с гибким соединением

Предложен метод синтеза нечетких регуляторов с TS-моделью для управления одним классом нелинейных динамических объектов. Получены аналитические формулы для расчета параметров настройки регулятора в зависимости от параметров объекта и желаемого показателя качества — максимальной степени устойчивости системы управления.

Ключевые слова: регулятор с нечеткой TS-моделью, нечеткие правила управления, максимальная степень устойчивости системы, пространство состояний

Введение

Ряд технологических процессов и мехатронных устройств, в частности манипуляционные роботы, как динамические объекты управления описываются нелинейными математическими моделями [1–5], причем в некоторых случаях движения этих нелинейных динамических объектов являются хаотиче-

скими [1, 3]. Одним из примеров, относящихся к таким объектам управления, является рука робота — манипулятор с гибким соединением [3, 5], функционирующий в условиях неопределенности.

При синтезе систем управления нелинейными объектами этот фактор неопределенности может учитываться в математических моделях объектов управления и/или управляющего устройства-регулятора [3, 7, 8]. Опираясь на критический анализ научной литературы в данной области, отметим, что методы синтеза нечетких систем управления, в частности нечетких регуляторов, нелинейными динамическими объектами с неопределенностью недостаточно разработаны [1, 3, 6].

В данной статье предлагается аналитический метод параметрического синтеза регулятора с нечеткой TS (Tagaki-Sugeno)-моделью по критерию максимальной — предельной — степени устойчивости для одного класса динамических объектов, описываемых в пространстве состояний нелинейной моделью, либо нечеткой TS-моделью в виде некоторого нечеткого лингвистического правила (НЛП).

Постановка задачи

Для наглядности постановки и решения задачи синтеза нечеткого управления в качестве нелинейного динамического объекта с неопределенностью рассмотрим хорошо известную математическую модель руки манипуляционного робота с гибким соединением [3, 5].

Пусть динамика руки робота с гибким соединением без учета трения описывается следующими дифференциальными уравнениями [3, 5]:

$$\begin{aligned} I_1 \ddot{\theta}_1(t) + mgl \sin \theta_1(t) + k(\theta_1(t) - \theta_2(t)) &= 0; \\ I_2 \ddot{\theta}_2(t) - k(\theta_1(t) - \theta_2(t)) &= u(t), \end{aligned} \quad (1a)$$

где $\theta_1(t)$ — угол поворота руки робота относительно горизонтальной оси; $\theta_2(t)$ — угол поворота вала привода робота, $u(t)$ — крутящий момент, вырабатываемый приводом; I_1, I_2 — инерционные моменты руки и вала привода, m — суммарная масса руки; l — расстояние от центра тяжести руки до соединения; g — постоянная гравитации; k — коэффициент жесткости.

Для обобщения постановки задачи вышеприведенную нелинейную модель объекта управления представим в пространстве состояний:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -\left(a_{21} \frac{\sin x_1(t)}{x_1(t)} + a_{23}\right)x_1(t) + a_{23}x_3(t) \\ x_4(t) \\ a_{41}x_1(t) - a_{43}x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix} u(t), \quad (1b)$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))^T$ — вектор состояния объекта с компонентами

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \theta_1(t), \quad x_2(t) = \dot{\theta}_1(t), \quad x_3(t) = \theta_2(t), \quad x_4(t) = \dot{\theta}_2(t); \\ a_{21} &= mgl/I_1, \quad a_{23} = k/I_1, \quad a_{41} = k/I_2, \quad a_{43} = a_{41}; \\ b_{41} &= \frac{1}{I_2} \text{ — постоянные параметры объекта.} \quad (2) \end{aligned}$$

Отметим, что математическая модель объекта управления нелинейна лишь относительно переменных состояния x_1 , поэтому ее легко можно представить следующей нечеткой TS-моделью [3, 5]:

НЛП объекта γ :

если x_1 есть "около x_1^r ",

тогда движение объекта описывается линейной моделью

$$\dot{x}(t) = A_r x(t) + B_r u(t), \quad (3)$$

$$\text{где } A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_{21}\alpha_r - a_{23} & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & 0 & -a_{43} & 0 \end{bmatrix}; \quad B_r = B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix};$$

$$\alpha_r = \frac{\sin x_1}{x_1} x_1^r, \quad r = 1, 2, \dots, q.$$

Учитывая особенности управляемого объекта, связанные с возможностью измерения фазовых переменных, а также с нечеткостью его модели, структуру регулятора можно выбрать в следующем виде:

$$u(t) = -Kx(t) = -k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_3 x_3 - k_4 x_4, \quad (4)$$

где $K = (k_1, \dots, k_4)$ — матричный усилитель.

На основе логического рассуждения можно прийти к выводу о том, что каждому r -му лингвистическому правилу объекта должно соответствовать управление $u_r(t)$. Иными словами для каждого r -го лингвистического правила объекта, описываемого моделью

$$\dot{x}(t) = A_r x(t) + B_r u(t),$$

желательно сконструировать управление-регулятор с нечеткой TS-моделью:

НЛП регулятора r :

если x_1 есть "около x_1^r ",

тогда выход регулятора

$$\begin{aligned} u(t) &= u_r(t) = K_r x(t) = \\ &= -k_{1r} x_1 - k_{2r} x_2 - k_{3r} x_3 - k_{4r} x_4, \quad r = 1, 2, \dots, q, \quad (5) \end{aligned}$$

где $K_r = (k_{1r}, \dots, k_{4r})$ — матричный усилитель.

Учитывая структуру моделей регулятора и объекта, замкнутую систему управления можно описать следующей нечеткой TS-моделью:

НЛП системы управления r :

если $x_1(t)$ есть "около x_1^r ",

тогда движение системы управления описывается уравнением

$$\dot{x}(t) = (A_r - BK_r)x(t) = D_r x(t), \quad (6)$$

где $D_r = (A_r - BK_r)$, причем

$$D_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_{21}\alpha_r - a_{23} & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} - b_{41}k_{1r} & -b_{41}k_{2r} & -(a_{43} + b_{41}k_{3r}) & b_{41}k_{4r} \end{bmatrix}.$$

После осуществления операции дефазификации переменная состояния замкнутой системы управления с нечеткой TS-моделью будет определяться по следующему выражению [3, 8, 9]:

$$\dot{x}(t) = \sum_{r=1}^q \mu_r(x(t))(D_r x(t)).$$

Здесь

$$\mu_r(x(t)) = \frac{\omega_r(x(t))}{\sum_{r=1}^q \omega_r(x(t))}, \quad \omega_r(x(t)) = \prod_{j=1}^n \Gamma_j^r(x_j(t)),$$

где $\Gamma_j^r(x_j(t))$ — степень принадлежности $x_j(t)$ к нечеткому терм-множеству Γ_j^r . Функции $\omega_r(x(t))$ и $\mu_r(x(t))$ имеют следующие свойства:

$$\omega_r(x(t)) \geq 0, \quad \sum_{r=1}^q \omega_r(x(t)) > 0,$$

$$\mu_r(x(t)) \geq 0, \quad \sum_{r=1}^q \mu_r(x(t)) = 1, \quad r = 1, 2, \dots, q.$$

Для рассматриваемого случая в лингвистических правилах использована только переменная x_1 , поэтому $\omega_r(x(t)) = \Gamma_1^r(x_1)$ и, тем самым, вышеописанные соотношения упрощаются.

Отметим, что устойчивость нелинейного движения замкнутой системы управления (6) зависит от устойчивости линейных движений соответствующих лингвистических правил. Таким образом, для нелинейного или нечеткого объекта (3) требуется синтезировать регулятор с нечеткой TS-моделью (4), чтобы в замкнутой системе (6) обеспечивалась максимальная степень устойчивости.

С учетом вышеописанных особенностей и определения [4, 7, 8] степень устойчивости задается действительной частью корней характеристических уравнений системы $P_r(\lambda, K_r) = 0$, $r = \overline{1, q}$, для каждого лингвистического правила.

Учитывая выбранную структуру регулятора, задачу синтеза нечеткой системы управления нелинейным динамическим объектом (3) можем формализовать следующим образом.

Требуется синтезировать такие настроечные параметры матричного усилителя K_r :

$$k_{jr} = k_{jr}(A_r, B_r), j = \overline{1, 4}, r = \overline{1, q},$$

нечеткого регулятора с TS-моделью (5), для которых при переходе замкнутой системы (6) из заданного начального состояния $x(0) = (x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40})^T$ в конечное состояние $x(t_k) = (0, 0, 0, 0)^T$ обеспечивается апериодический характер переходного процесса и максимальная степень устойчивости системы управления:

$$J_r = \max\{\operatorname{Re} \lambda_r(A_r, B_r, K_r)\}. \quad (7)$$

Решение задачи

Формализованную задачу синтеза можно решить непосредственно распределением (с учетом апериодичности и максимума J_r) характеристических уравнений замкнутой системы (6), для чего преобразовываем систему, т. е. четыре одномерных дифференциальных уравнения (6), в одно четырехмерное дифференциальное уравнение и составляем характеристические уравнения. Для этого можно применить существующие способы, например методы Данилевского, Крылова и др. Эти способы можно применить лишь при известных числовых значениях всех параметров системы. Этот факт ограничивает их применение для рассматриваемого случая, т. е. определения характеристического уравнения замкнутой системы. Поэтому путем расстановки и несложных преобразований систему четырех одномерных дифференциальных уравнений преобразуем к единому четырехмерному уравнению:

$$x_1^{(4)}(t) = k_{4r}x_1^{(3)}(t) + (a_{21}a_{23}\alpha_r + a_{41} + bk_{3r})x_1^{(2)}(t) + b[(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{4r} + a_{23}k_{2r}]x_1^{(1)}(t) + [a_{21}a_{41}\alpha_r + b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{3r} + bk_{1r}]x(t) = 0, r = \overline{1, q}. \quad (8)$$

Из последнего выражения определяем характеристические уравнения замкнутой системы управления для каждого правила:

$$P_r(\lambda, A_r, K_r) = \lambda^4 + d_{1r}\lambda^3 + d_{2r}\lambda^2 + d_{3r}\lambda + d_{4r} = 0, \quad (9)$$

где

$$d_{1r} = bk_{4r}, d_{2r} = (a_{21}a_{23}\alpha_r + a_{41} + bk_{3r}), r = \overline{1, q},$$

$$d_{3r} = b[(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{4r} + a_{23}k_{2r}],$$

$$d_{4r} = a_{21}a_{41}\alpha_r + b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{3r} + bk_{1r}.$$

Для удовлетворения требования об апериодичности переходного процесса желательно, чтобы все корни характеристического уравнения замкнутой системы управления (9) были отрицательными действительными. Это условие обеспечивается для двух случаев распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы управления:

- а) все корни отрицательные действительные и равны друг другу;
- б) все корни отрицательные действительные и разные.

Отметим, что остальные случаи — варианты расположения корней характеристического уравнения — не представляют интереса с точки зрения обеспечения требуемого качества переходного процесса системы управления и аналитического синтеза параметров регулятора. С точки зрения обеспечения требуемых показателей качества (точности, быстродействия и устойчивости) вариант а распределения корней является наиболее важным и сложным случаем. Учитывая это, в данной статье задача аналитического параметрического синтеза нечеткого регулятора решается для варианта а.

Пусть желаемые корни характеристического уравнения $\lambda_{jr} = J_r$, $j = 1, 2, 3, 4$. Тогда желаемое характеристическое уравнение замкнутой системы можно записать в виде

$$\phi_r(\lambda) = (\lambda + J_r)^4 = \lambda^4 + 4J_r\lambda^3 + 6J_r^2\lambda^2 + 4J_r^3\lambda + J_r^4 = 0, r = \overline{1, q}. \quad (10)$$

Определим производные первого, второго и третьего порядка от каждого из полиномов $P_r(\lambda, A_r, K_r)$ и $\phi_r(\lambda)$:

$$\begin{cases} P_r^{(1)}(\lambda) = 4\lambda^3 + 3d_{1r}\lambda^2 + 2d_{2r}\lambda + d_{3r}; \\ P_r^{(2)}(\lambda) = 12\lambda^2 + 6d_{1r}\lambda + 2d_{2r}; \\ P_r^{(3)}(\lambda) = 24\lambda + 6d_{1r}, r = 1, 2, \dots, q; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \phi_r^{(1)}(\lambda, J_r) = 4\lambda^3 + 12J_r\lambda^2 + 12J_r^2\lambda + 4J_r^3; \\ \phi_r^{(2)}(\lambda, J_r) = 4\lambda^3 + 12\lambda^2 + 24J_r\lambda + 12J_r^2; \\ \phi_r^{(3)}(\lambda, J_r) = 24\lambda + 24J_r, r = 1, 2, \dots, q. \end{cases} \quad (12)$$

Из условия равенства желаемого полинома $\phi_r^{(3)}(\lambda, J_r)$ и действительного полинома $P_r^{(3)}(\lambda)$ соответственно в (12) и (11) определяем степень устойчивости, выраженную через параметры системы, т. е. объекта и настроечного коэффициента регулятора

$$24J_r = 6d_r \Rightarrow J_r = b_{4r}k_{4r}/4.$$

Отсюда видно, что максимальная степень устойчивости замкнутой системы управления определяется максимально допустимым значением k_{4r} , т. е. $k_{4r}^{\max}$:

$$J_{r\max} = \max\left(\frac{b_{4r}k_{4r}}{4}\right) = \frac{b_{4r}k_{4r}^{\max}}{4}. \quad (13)$$

Учитывая, что параметр b_{4r} не изменяется и нелинейный параметр α_r объекта не влияет на степень устойчивости, формулу (13) можно записать без индекса r , т. е.

$$J_{r\max} = J_{\max} = \frac{bk_4^{\max}}{4}.$$

Из условия равенства фактического (9) и желаемого (10) полиномов, а также соответствующих полиномов из (11), (12) можем записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} a_{21}a_{23}\alpha_r + a_{41} + bk_{3r} &= 6J_{\max}^2; \\ ba_{23}k_{2r} + b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_4 &= 4J_{\max}^3; \\ a_{21}a_{23}\alpha_r + b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{3r} + bk_{1r} &= J_{\max}^4, \\ r &= 1, 2, \dots, q. \end{aligned} \quad (14)$$

На основе (14) определяем аналитические выражения для вычисления настроечных коэффициентов k_{3r} , k_{2r} , k_{1r} регулятора, которые зависят от параметров нелинейного объекта, параметра k_4 и максимальной степени устойчивости системы:

$$\begin{aligned} k_{3r} &= (6J_{\max}^2 - a_{41} - a_{21}a_{23}\alpha_r)/b; \\ k_{2r} &= [4J_{\max}^3 - b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_4]/ba_{23}; \\ k_{1r} &= [J_{\max}^4 - a_{21}a_{41}\alpha_i - b(a_{21}\alpha_r + a_{23})k_{3r}]/b, \\ r &= \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, поставленная задача синтеза структуры базы знаний (т. е. нечетких лингвистических правил) и настроечных параметров k_{4r} , k_{3r} , k_{2r} , k_{1r} нечеткого регулятора решена.

Пример 1. Пусть начальное состояние и параметры нелинейного динамического объекта-руки ма-

нипуляционного робота с гибким соединением имеют следующие значения [5]:

$$\begin{aligned} x(0) &= (\pi/2, 0, \pi/2, 0), \quad I_1 = I_2 = 1 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2), \\ k &= 0,05 \text{ (Н} \cdot \text{м/рад)}, \quad m = 0,01 \text{ (кг)}, \\ l &= 1 \text{ (м)}, \quad g = 9,81 \text{ (м/с}^2) \end{aligned}$$

или с учетом (2):

$$a_{21} = 0,0981; \quad a_{23} = 0,05; \quad a_{41} = a_{43} = 0,05; \quad b_4 = 1.$$

Структура и база знаний — лингвистические правила нечеткого регулятора в соответствии (5) имеет следующий вид:

НЛП регулятора 1:

если переменная состояния системы x_1 есть

около $x_1^1 = 0$,

тогда выход регулятора

$$u(t) = u_1(t) = -k_{11}x_1 - k_{21}x_2 - k_{31}x_3 - k_{41}x_4.$$

НЛП регулятора 2:

если переменная состояния системы x_1 есть

около $x_1^2 = \pi/2$,

тогда выход регулятора

$$u(t) = u_2(t) = -k_{12}x_1 - k_{22}x_2 - k_{32}x_3 - k_{42}x_4.$$

Для двух значений $x_1^1 = 0$ и $x_1^2 = \pi/2$ параметры нелинейности α_r объекта в соответствии с моделью (3) будут иметь значения $\alpha_1 = 1$ и $\alpha_2 = 2/\pi$.

Функция принадлежности нечетких Γ_1^1 и Γ_1^2

терм-множеств "около $x_1^1 = 0$ " и "около $x_1^2 = \pi/2$ " выбрана треугольного вида, т. е.

$$\begin{aligned} \omega_1(x_1) &= \begin{cases} 1 & \text{при } -\frac{\pi}{2} \geq x_1 \geq \frac{\pi}{2}; \\ \frac{2}{\pi} x_1 & \text{при } 0 \leq x_1 \leq \frac{\pi}{2}; \\ -\frac{2}{\pi} x_1 & \text{при } -\frac{\pi}{2} \leq x_1 \leq 0; \end{cases} \\ \omega_2(x_1) &= 1 - \omega_1(x_1). \end{aligned}$$

Согласно аналитическим выражениям (13)—(15) вычисляются настроечные параметры регулятора k_{3r} , k_{2r} , k_{1r} ($r = 1, 2$) с выбором значений по итеративной процедуре путем увеличения параметра k_4 от некоторого минимального базового значения ($k_4^{\text{баз}} = 2$), при котором обеспечивается условие (7), т. е. k_{3r} , k_{2r} , $k_{1r} \geq 0$ ($r = 1, 2$). При этом значении k_4 степень устойчивости системы $J = 0,5$ и для его максимизации коэффициент настройки k_4 можно увеличивать до $k_4 = 12$.

Результаты компьютерного моделирования нечеткой системы управления рукой манипуляционного робота с гибким соединением при значении параметра регулятора $k_4 = 4$ и максимальной степени устойчивости $J_{\max} = 1$ подтверждают перио-

дичность переходного процесса по x_1 и высокую динамическую точность системы.

Заключение. Разработанная методика синтеза нечеткого регулятора для высококачественного управления одним классом нелинейных (или нечетких) динамических объектов позволяет вычислить настроечные коэффициенты регулятора с помощью простых аналитических выражений в зависимости от параметров объекта и максимальной степени устойчивости замкнутой системы управления. В случае изменения параметров объекта несложно выполнить перерасчет настроечных коэффициентов регулятора, иными словами, провести адаптацию системы управления.

Список литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989.
2. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. М.: МГТУ, 2000.

3. Zhong Li. Fuzzy Chaotic Systems. Springer, 2006.
4. Алиев Р. А., Джафаров С. М., Бабаев М. Дж. и др. Принципы построения и проектирования интеллектуальных систем. Баку: Нагиз, 2005.
5. Evren Gürkan, Stephen P. Banks, Ismet Erkmen. Stable Control Design for the T-S Fuzzy Model of a Flexible Joint Robot Arm based on Lie Algebra // Proc. of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Mani, Hawaii USA, December 2003. P. 4717–4722.
6. Tanaka K., Sugeno M. Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems // Fuzzy Sets and Systems. 1992. 45. P. 135–156.
7. Jafaroy P. S., Zeynalov E. R., Jafarov S. M. Fuzzy controller's analytic synthesis and modeling for the objects with fuzzy dynamic models // Eightins International Conference on Application of Fuzzy System and Soft Computing, Helsinki, Finland, September 1–3. 2008.
8. Jafarov P. S., Zeynalov E. R. Analytic synthesis of control in dynamic systems with delay argument and fuzzy TS model // The second international conference "Problems of cybernetics and informatics" Baku, Azerbaijan, September, 2008. P. 47–50.
9. Jafarov P. S., Zeynalov E. R., Jafarov S. M. Design of control system described by fuzzy differential equation // Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. Famagusta, North Cyprus 2–4 September, 2009. P. 298–302.

УДК 681.586

Ф. И. Мамедов¹, чл.-корр.

Национальной академии наук Азербайджана,
д-р техн. наук, проф., зав. каф.,

Р. Ш. Асадова², канд. техн. наук, зав. отделом,
Renaasadova2007@rambler.ru

К. Ф. Асадова¹, аспирантка,

С. Г. Асад-заде³, студентка,

¹ Сумгаитский государственный университет,

² Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана,

³ Азербайджанская нефтяная академия

Двухмерный индуктивный преобразователь для измерения линейных и угловых перемещений

Описывается двухфункциональный индуктивный датчик, предназначенный для одновременного и независимого измерения линейных и угловых перемещений с широким диапазоном и повышенной точностью измерения, обладающий широкими функциональными возможностями, повышенной чувствительностью и точностью. Отмечается технико-экономическое преимущество предложенной конструкции в сравнении с базовым объектом.

Ключевые слова: индуктивный преобразователь, печатные платы, двухфункциональный индуктивный измеритель

Введение

Вопросам исследования и разработки двухмерных индуктивных датчиков (ДИД) на печатных платах, выбору и расчету их оптимальных электромагнитных характеристик и конструктивных пара-

метров посвящено сравнительно небольшое число работ. Существующие датчики, изготавливаемые традиционными методами, далеки от совершенства, имеют значительные геометрические размеры, требуют высоких затрат ферромагнитных материалов, сложной технологии изготовления и обладают невысокой энергетической эффективностью [1, 2]. В связи с этим использование наноматериалов в элементах электроники, изготавливаемых с использованием нанотехнологий и обладающих высокой химической чистотой, позволяет обеспечить производство датчиков, отвечающих современным требованиям.

Данная статья посвящена разработке ДИД на печатной плате, предназначенного для одновременного и независимого измерения линейных и угловых перемещений объектов в различных отраслях промышленности [3–6].

Анализ и характеристика существующих ДИД

Сравнительный анализ существующих ДИД показал, что они имеют сложную конструкцию, которая не позволяет изготовить датчик с удовлетворительными метрологическими характеристиками. Узким местом в этих датчиках являются взаимодействующие между собой измерительные обмотки и обмотки возбуждения. Технология их размещения в роторе и статоре не дает прочных и надежных электроконтактов, что влияет на точность измерения. Большое расстояние между ротором и статором, которое также невозможно сократить из-за нетехнологичной укладки обмоток, уменьшает электромагнитный поток, что не дает возможность увеличить диапазон измерения и расширить функцио-

нальные свойства датчика. Представителями таких ДИД являются индуктивные преобразователи линейных и угловых перемещений [1—3]. Известен индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений, содержащий цилиндрический магнитопровод, внутри которого соосно размещен ферромагнитный ротор, имеющий в развертке форму ромба. В кольцевых проточках внутренней поверхности магнитопровода размещены секции первичной обмотки возбуждения и секции первичных и вторичных обмоток для измерения линейных и угловых перемещений вдоль продольной оси преобразователя. Секции вторичных обмоток для измерения линейных и угловых перемещений соединены между собой по дифференциальной схеме. Секции первичных обмоток возбуждения соединены в каждой паре последовательно-согласно и питаются от источника напряжения переменного тока. Этот преобразователь обладает низкой чувствительностью, точностью измерения линейных и угловых перемещений и имеет сложную конструкцию магнитопровода.

Другим представителем подобных ДИД является индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений, который содержит неподвижный цилиндрический магнитопровод — статор [3, 4]. Внутри статора, соосно с ним, установлен подвижный относительно статора ферромагнитный ротор, имеющий форму цилиндра. На внутренней поверхности статора в продольных пазах размещена пара секций обмоток, одна из которых содержит обмотку возбуждения и измерительную обмотку для измерения линейных перемещений, а вторая содержит обмотку возбуждения и обмотку для измерения угловых перемещений относительно оси преобразователя. Обмотки для измерения как линейных, так и угловых перемещений соединены между собой по дифференциальной схеме, а обмотки возбуждения обеих секций соединены между собой последовательно-согласно и питаются от источника напряжения переменного тока.

Данное устройство хорошо зарекомендовало себя при перемещении грузов с небольшими габаритными размерами, но из-за узкого диапазона измерений это устройство нельзя использовать для перемещения крупногабаритных объектов.

Другим недостатком этого преобразователя является низкая точность измерения, что является следствием сложной конструкции преобразователя и нетехнологичной укладки проводов обмоток, которая не позволяет достичь надежного контакта измерительных обмоток. Кроме того, подобная конструкция не позволяет уменьшить расстояние между статором и ротором, что ухудшает магнитопоток и не дает возможность расширить диапазон измерений.

В целях устранения вышеуказанных недостатков в конструкции двумерного датчика была разработана новая конструкция такого устройства на печатной плате.

Описание разработанного ДИД

В разработанном устройстве измерительные обмотки и обмотки возбуждения выполнены в виде печатных плат, что позволило упростить конструкцию устройства и уменьшить зазор между статором и ротором. В результате такого конструктивного решения повысилась надежность соединений обмоток, увеличился магнитопоток между ними, что улучшило точность измерения и расширило диапазон измерений.

Данный индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений содержит неподвижный цилиндрический магнитопровод — статор с измерительными обмотками — и установленный соосно внутри статора полуцилиндрический ферромагнитный ротор с обмотками возбуждения. Обмотка возбуждения подключена к источнику переменного тока, а пара секций измерительных обмоток соединена между собой по дифференциальной схеме. Обмотка возбуждения и секции измерительных обмоток выполнены раздельно в виде плат, одна из которых установлена на внутренней поверхности статора, а другая — на внешней поверхности ротора. Провода измерительных обмоток уложены зигзагообразно в форме четырех попарно симметричных треугольников. Разработанная конструкция ДИД является более технологичной. Она позволяет уменьшить зазор между статором и ротором из-за применения обмоток возбуждения и измерительных обмоток в виде печатных плат. А это, в свою очередь, увеличивает магнитопроводность и, следовательно, точность и диапазон измерения. Кроме того, печатные платы создают прочное соединение обмоток, что повышает надежность конструкции.

На рис. 1 представлен общий вид со статором в развертке, рабочие характеристики приведены на рис. 2, а на рис. 3 — схема устройства, где 1 — ста-

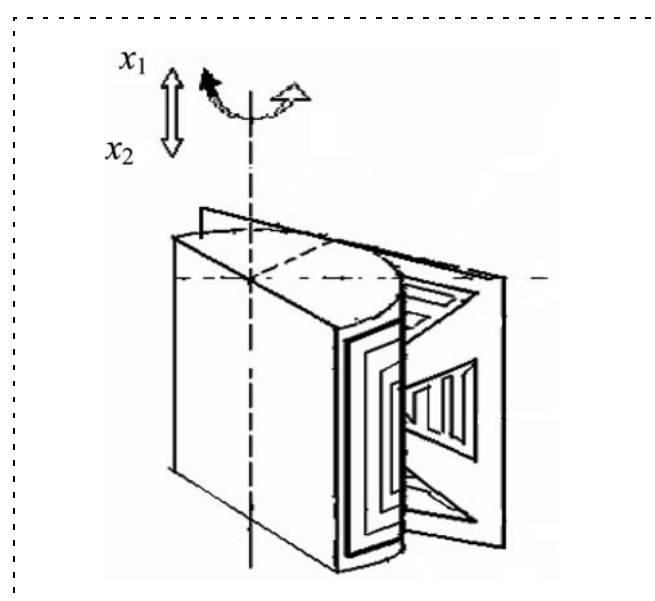


Рис. 1. Общий вид устройства

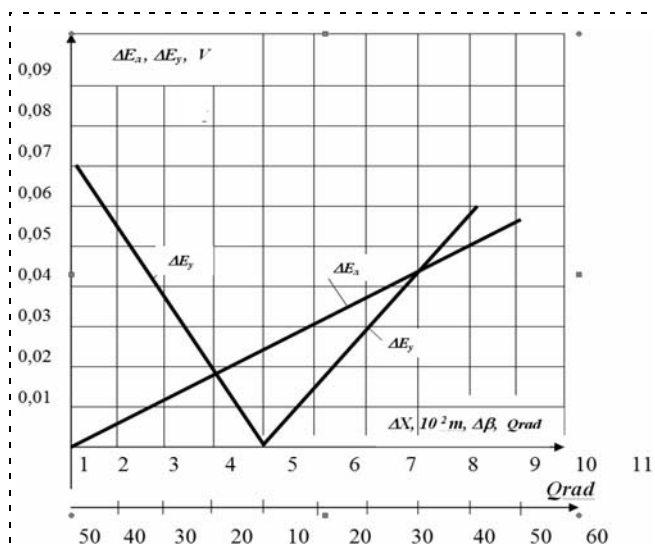


Рис. 2. Рабочие характеристики преобразователя: ΔE_x — для цепи линейного перемещения; ΔE_y — для цепи углового перемещения

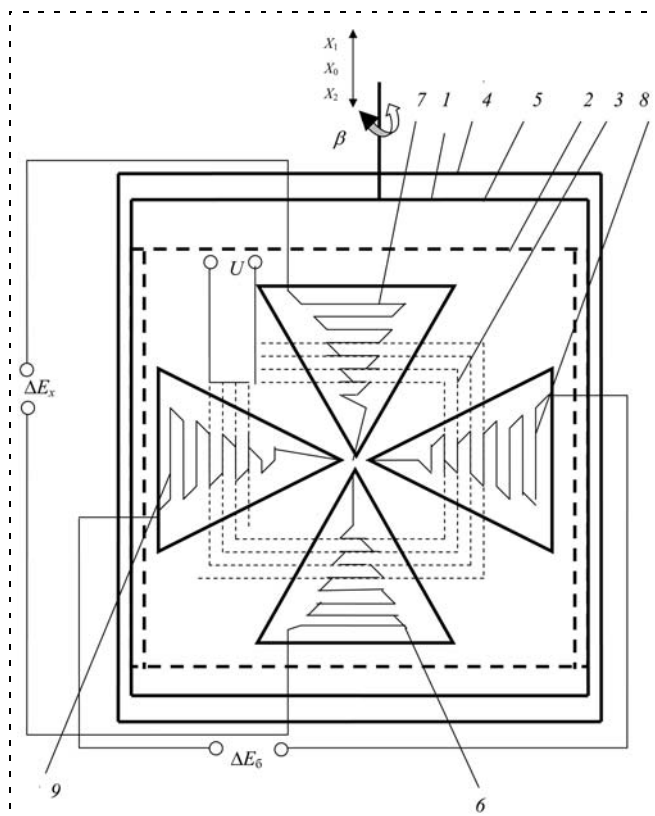


Рис. 3. Схема устройства в развертке

тор, 2 — печатная плата возбуждения, 3 — провода обмотки возбуждения, 4 — ротор, 5 — печатная плата измерительных обмоток, 6 и 7 — измерительные обмотки для измерения линейного перемещения, 8 и 9 — измерительные обмотки для измерения углового перемещения.

Индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений работает следующим образом.

В исходном положении (X_0) провод обмотки возбуждения 3 на плате 2 расположен симметрично

относительно измерительных обмоток линейного перемещения 6 и 7 (платы 5) и измерительных обмоток углового перемещения 8 и 9 (платы 5). При таком расположении обмоток их ЭДС равны 0. При движении ротора 1 вдоль оси преобразователя в направлении X_1 (или X_2) площадь перекрытия измерительной обмотки 7 (или 6) платы 5 обмоткой возбуждения 3 платы 2 увеличивается, и, соответственно, уменьшается площадь перекрытия им обмоток 6 (или 7). В результате этого наведенная ЭДС в обмотке 7 (или 6) увеличивается, а в обмотке 6 (или 7) уменьшается, создавая на выходе величину ΔE_x , пропорциональную линейному перемещению платы 2 с обмоткой возбуждения 3 вдоль оси преобразователя от X_0 до X_1 (или X_2).

При вращении платы возбуждения 2 с обмоткой возбуждения 3 вокруг оси преобразователя по часовой стрелке (или против) увеличивается площадь перекрытия обмотки 8 (или 9) платы 5 и, соответственно, уменьшается площадь перекрытия обмотки 9 (или 8), создавая на выходе величину ΔE_y , пропорциональную угловому перемещению. При этом взаимное влияние между измерительными цепями отсутствует, так как перекрытие обмоткой возбуждения площадей измерительных обмоток линейных или угловых перемещений происходит автономно [5].

Заключение

Разработан двухфункциональный индуктивный датчик на печатных платах, предназначенный для одновременного и независимого измерения линейных и угловых перемещений с широким диапазоном и повышенной точностью измерения. Он имеет простую технологию изготовления, которая позволяет значительно уменьшить геометрические размеры и снизить затраты ферромагнитных материалов. Полученные рабочие характеристики подтверждают то, что предлагаемый преобразователь, по сравнению с существующими, обладает широкими функциональными возможностями, повышенной чувствительностью и точностью.

Список литературы

1. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М.: Машиностроение, 1979. 479 с.
2. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Перевод с англ. и редактирование М. М. Фетисова, Л.: Энергия, 1970. 360 с.
3. Асадова Р. Ш., Саттаров В. К., Мамедов Дж. Ф. Двухмерный электромагнитный датчик дифференциального типа // Автоматизация и современные технологии. 1997. № 10. С. 6—8.
4. Мамедов Ф. И., Асадова Р. Ш., Саттаров В. К., Мамедов Дж. Ф. Двухфункциональный индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений. Патент Аз. Респ. № Р 990049 от 19 июня 1999 г.
5. Асадова Р. Ш., Мамедов Дж. Ф. Двухмерный электромагнитный преобразователь перемещений // Электротехника. 2002. № 6. 55—57 с.
6. Асадова Р. Ш., Мамедов Ф. И., Асадова К. Ф. Индуктивный преобразователь линейных и угловых перемещений. Патент Аз. Респ. Az I 2008 0051, от 07.04.2008.

Г. А. Гулуев, канд. техн. наук, директор СКБ,
scb_06@mail.ru

А. Г. Рзаев, канд. техн. наук, зав. лаб.,

Я. Г. Алиев, канд. техн. наук, инженер-электронщик,

М. Г. Ризванов, канд. техн. наук, науч. сотр.,

И. Р. Саттаров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана

Интеллектуализированная станция управления станком-качалкой

Разработана станция управления станком-качалкой при механизированном способе добычи нефти. Приведены структурные схемы станции, блока управления и защиты и коммуникатора LCD (liquid-crystal display), а также структура меню коммуникатора LCD. Показаны результаты конструктивного исполнения.

Ключевые слова: штанговые глубинные насосы, станок-качалка, станция управления, коммуникатор, микроконтроллер

Введение. Известно, что одним из распространенных способов добычи нефти является механизированный способ, при котором в основном используются штанговые глубинные насосы (ШГН), приводимые в действие станками-качалками на базе асинхронных электродвигателей.

В зависимости от глубины скважин имеются разные типы станков-качалок, мощность электродвигателей которых, в основном, находится в пределах от 2 до 55 кВт, хотя в последнее время нередко встречаются двигатели и с мощностью до 75 кВт.

Оборудование скважин, как правило, работает в очень суровых полевых условиях и поэтому контроль параметров, оптимизация режимов работы, своевременное выявление возникающих неисправностей всегда являются актуальными задачами.

В последние годы проделаны важные теоретические работы [1–4] по обработке сигналов циклических процессов, где применение робастных алгоритмов, частотно-избыточных технологий и технологии анализа помех позволяет выявлять дефекты на стадии их зарождения, что обеспечивает своевременное предотвращение серьезных аварий. Использование результатов этих работ при разработке и создании станций управления может существенно улучшить их характеристики.

За период эксплуатации станков-качалок разработаны разные поколения станций управления — от простых устройств защиты до современных микропроцессорных станций.

Наиболее широко распространенные в нефтяных промыслах современные станции управления описаны в работах [5–8]. Все эти станции в основ-

ном предназначены для управления и контроля работы электродвигателя, т. е. привода ШГН.

В последние годы с развитием микропроцессорных и информационных технологий все большее распространение получила тенденция совмещения функций контроля и защиты электродвигателей с функциями контроля и управления штанговыми глубинными насосами в одном контроллере.

К вышеуказанным разработкам можно отнести наиболее распространенные в странах СНГ станции управления ШГН [9–11] и др.

Все эти станции управления предназначены для автоматизации работы станка-качалки ШГН и работают в системах автоматизированного управления процессом нефтедобычи. Необходимо отметить, что заложенные в этих разработках алгоритмы измерения и обработки параметров предусматривают защиту оборудования при явном отклонении этих параметров и возникновении аварий.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается задача разработки принципов построения и одного из возможных вариантов систематической реализации интеллектуализированной станции управления станком-качалкой (ИСУ СК), обеспечивающей обработку измерительной информации на основе робастных алгоритмов, частотно-избыточных технологий и технологии анализа помех [1].

Данная обработка информации позволяет выявить дефекты технологического оборудования как станков-качалок, так и наземного оборудования на стадии зарождения, т. е. до появления явных аварий. С этой целью структурная схема интеллектуализированной станции управления должна иметь дополнительные возможности для:

- управления частотой и временем измерения каждого канала как в отдельности, так и в группе;
- скоростного накопления информации, полученной путем избыточно-частотного измерения [1] в памяти контроллера с последующей передачей в компьютер диспетчерского пункта по каналам телемеханики.

Принципы построения ИСУ СК. В рассматриваемой системе, построенной на базе микроконтроллеров промышленного назначения, использование робастных алгоритмов и технологии анализа помехи приводит к улучшению технико-экономических показателей (надежности, потребляемой мощности и др.). Все эти характеристики придают системе принципиально новые потребительские качества (расширенные функциональные возможности, модифицируемость, адаптивность и т. д.).

В данной статье описан принцип функционирования интеллектуализированной станции управления станком-качалкой. В результате применения робастных алгоритмов, избыточно-частотной технологии и технологии анализа помехи удастся программным путем реализовывать многие функции, которые ранее выполнялись аппаратным способом. Это дает возможность упростить аппаратную часть

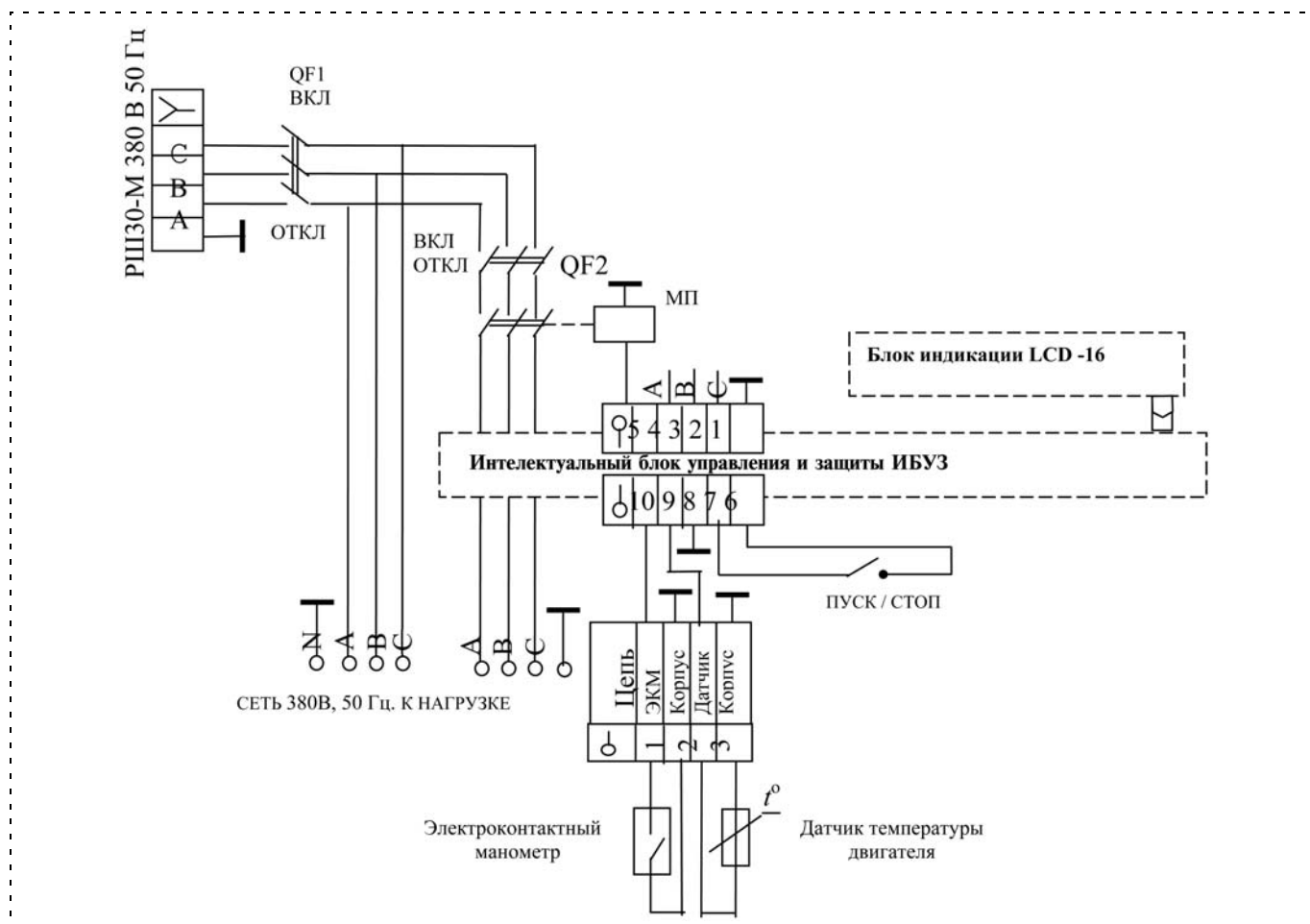


Рис. 1. Общая схема ИСУ СК

станции управления, что приводит к повышению надежности и гибкости станции управления.

Общая схема станции управления приведена на рис. 1.

- Станция управления станком-качалкой состоит из:
- интеллектуального блока управления и защиты (ИБУЗ);
 - коммуникатора LCD, стандартных автоматических выключателей QF1, QF2, магнитного пускателя (МП) и клеммных соединений.

Автоматический выключатель QF1 обеспечивает электропитанием внешние потребители для выполнения электрических работ около скважины, QF2 обеспечивает питанием двигателя станка-качалки через контакты магнитного пускателя, который управляется от БУЗ.

Интеллектуальный блок управления и защиты. Основные функции ИБУЗ состоят в измерении токов фаз и температуры асинхронного двигателя, слежении за состоянием внешних сигналов (электроконтактный манометр, переключатель "пуск/стоп", несанкционированный доступ и т. д.), обработке сигналов, выдаче управляющего сигнала к катушке магнитного пускателя, приеме и передаче информации на диспетчерский пункт телемеханической связи.

На рис. 2 приведена одна из возможных структурных схем ИБУЗ. ИБУЗ состоит из узла трансформаторов тока, модуля питания и контроля токов (МПКТ) и модуля контроллера (МК). Разработаны принципиальные схемы и конструктивные чертежи МПКТ и МК.

Выходные токи трансформаторов T1, T2 и T3, пропорциональные токам соответствующих фаз потребителя, через узел контроля токов фаз (УКТФ) преобразуются в пропорциональные напряжения U_{1a} , U_{1b} , U_{1c} и подаются на аналоговые входы Ain0, Ain1, Ain2 для последующего преобразования в десятиразрядный двоичный код. Фазовые напряжения сети в узле последовательности фаз преобразуются в импульсы транзисторно-транзисторной логики для подачи на дискретные входы PB0, PB1, PB2 микроконтроллера. Эти импульсы, как и фазовые напряжения трехфазной сети, сдвинуты относительно друг друга на 120° . Микроконтроллер (МК), контролируя наличие и последовательность фаз, защищает двигатель от нарушения последовательности и пропадания фаз.

В узле питания формируются необходимые для функционирования ИБУЗ и сервисного коммуникатора LCD электрическое питание постоянного и стабилизированного напряжения от трехфазного

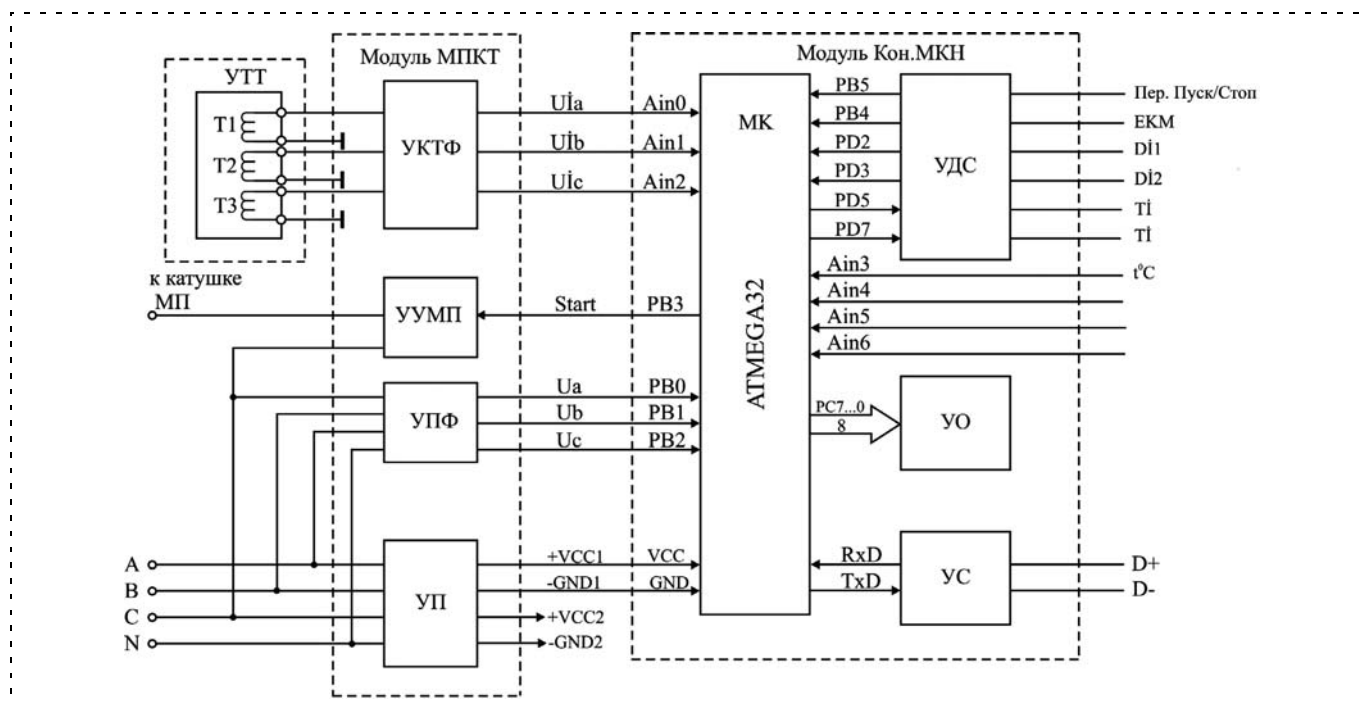


Рис. 2. Структурная схема интеллектуального блока управления и защиты

выпрямителя. При пропадании одной из фаз выходные напряжения обеспечивают нормальное функционирование ИБУЗ, что очень важно для передачи информации о случившейся аварии на верхний уровень.

В узле управления магнитным пускателем выходной сигнал микропроцессора через оптронную развязку и симистор усиливается до уровня, достаточного для управления катушкой магнитного пускателя (380 В, 1 А).

В узле дискретных сигналов происходит оптронная развязка сигналов, получаемых от объектов сигнализации и подача их на вход МК. МК контролирует состояние переключателя пуск/стоп.

Узел отображения собран на светодиодах и предназначен для отображения аварийных состояний контролируемого объекта и функционирования ИБУЗ в целом на лицевой панели.

Узел связи обеспечивает работу ИБУЗ с сервисным коммуникатором LCD или компьютером по интерфейсу RS485 по протоколу MOD BUS RTU.

МК по записанной в его постоянной памяти программе сбора и обработки информации выполняет все функции по защите и управлению двигателем, а также передачу информации на компьютер или же коммуникатор LCD для дальнейшего анализа результатов контроля.

Коммуникатор LCD. Основная функция коммуникатора LCD заключается в программировании процесса функционирования станции управления, т. е. в опросе через интерфейс RS 485 по протоколу MOD BUS RTU, получении данных параметров

поочередно от модуля АЦП, обработке и показе их на жидкокристаллическом мониторе.

Блочная схема коммуникатора LCD приведена на рис. 3. Она состоит из микроконтроллера ATMEGA 32 фирмы Atmel, узла связи с интерфейсом RS 485, узла кнопок и узла индикации на базе 16-символьного жидкокристаллического дисплея DV16110S1RB фирмы Date Vision.

При подключении коммуникатора LCD к станции управления запускается ролик параметров и поочередно через каждые 3 с на экране появляются параметры.

С помощью пяти функциональных кнопок можно вмешаться в работу микропроцессоров, модуля АЦП, коммуникатора и менять режим их работы.

Структура меню коммуникатора LCD приведена на рис. 4.

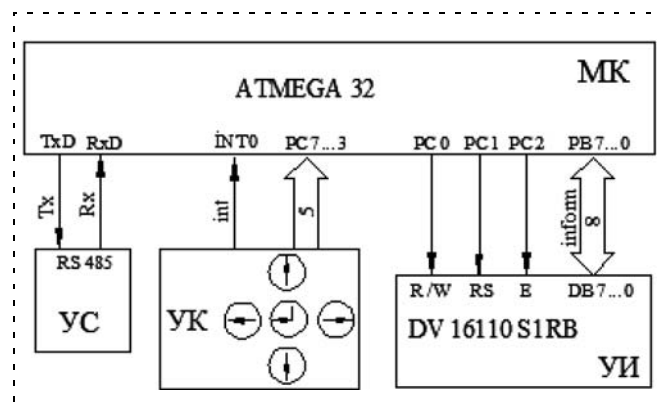


Рис. 3. Блочная схема коммуникатора LCD

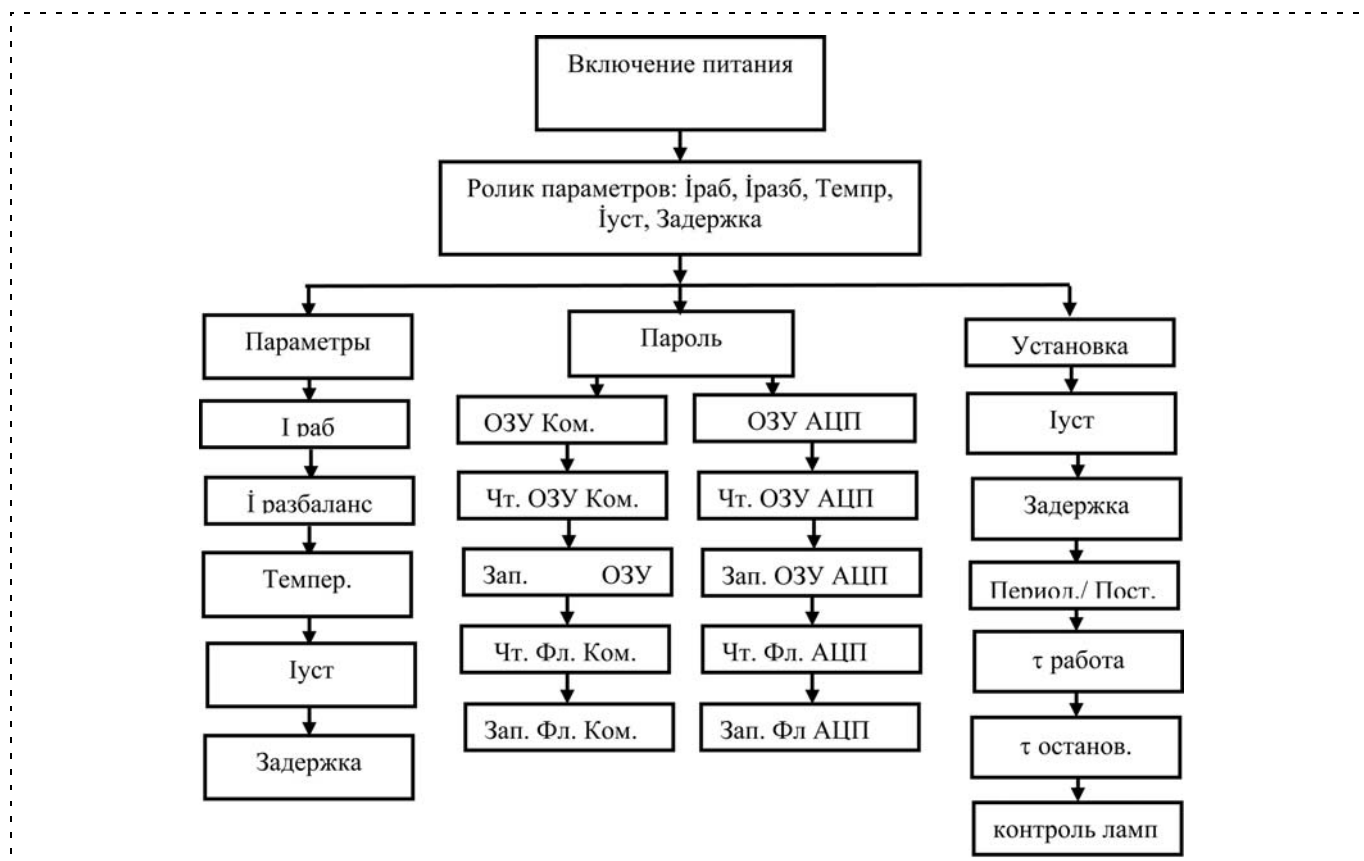


Рис. 4. Структура меню коммуникатора LCD

Пользуясь пятью функциональными кнопками, можно войти в любое меню. Функции кнопок следующие:

"←" — вход в главное меню, движение по цифрам влево;

"↔" — движение по цифрам вправо;

"←|" — выбор меню, ввод цифр;

"↑" — движение по меню вверх, увеличение цифр;

"↓" — движение по меню вниз, уменьшение цифр.

Ниже разъясняется функция каждого меню и инструкция по пользованию.

- Меню "Ролик параметров" срабатывает при включении и через каждые 3 с показывает поочеред-

но на экране значения параметров; при нажатии кнопки "←" переходит в главное меню "Параметры", где с помощью кнопок "↑", "↓" можно перейти в главное меню "Установка" или на "Пароль".

- Главное меню "Параметры" через каждые 3 с показывает значение выбранного параметра. Оно имеет пять подменю. При нажатии кнопки "←|" на экране появляется $I_{\text{раб}} = \dots$. Далее, пользуясь кнопками "↑", "↓", "←|", можно войти в любое подменю для индикации параметров $I_{\text{разб}}$, $I_{\text{уст}}$ и $I_{\text{задерж}}$. Выход из подменю осуществляется с помощью кнопки "←".

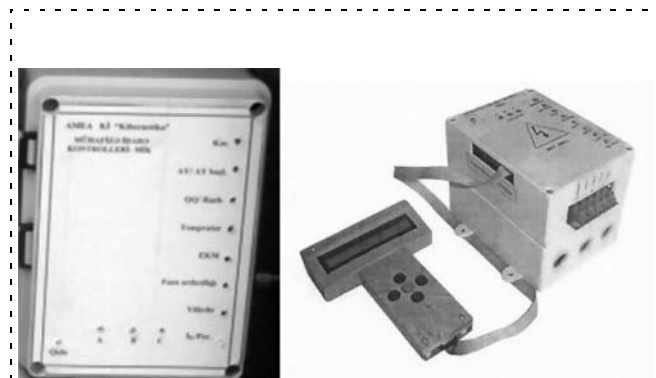


Рис. 5. Общий вид ИБУЗ и подключение к коммуникатору LCD

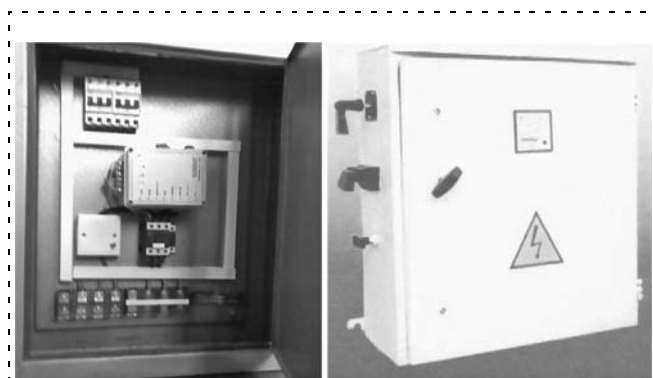


Рис. 6. Общий вид интеллектуальной станции управления

- Главное меню "Установка" при установке его на конкретный объект осуществляет запись необходимых параметров станции управления. Это меню имеет шесть подменю для установки: "I_{уст}", "Задерж.", "Период/Пост", "Тау работа", "Тау остан.", "контроль лампы". Запись цифр и ввод осуществляется с помощью кнопок "↑", "↓", "←" аналогично пункту 2.

- Главное меню "Пароль" осуществляет запись/чтение в запоминающее устройство контроллеров, модулей ЛЦП и коммуникатора LCD данных, которые относятся к внутреннему программному обеспечению. Пользователь станции управления этими данными не оперирует.

На основе структурной схемы (см. рис. 2) и блочной схемы (см. рис. 3) разработаны интеллектуальный блок управления защитой и коммуникатор LCD, общий вид и подключение которых приведены на рис. 5. На рис. 6 приведен общий вид интеллектуальной станции управления. Проведены лабораторные испытания, опытный образец прошел промышленные испытания на нефтяном промысле Бинагади Ойл Азербайджана.

Заключение. Разработан один из возможных вариантов структурной схемы интеллектуальной станции управления станками-качалками, блочная схема и структура меню сервисного коммуникатора LCD. Практическая реализация осуществлена на базе микроконтроллера ATMEGA 32 фирмы Atmel, отвечающего критериям низкой цены, открытости, простоты, дистанционного контроля, надежности и гибкости.

Предлагаемая интеллектуальная станция управления установкой штанговых глубинных насосов позволяет диагностировать неисправности наземного и подземного оборудования скважины на стадии их зарождения.

Список литературы

1. Aliev T. A. Digital Noise Monitoring of Defect Origin. London: Springer-Verlag, 2007. 235 p.
2. Aliev T. A., Alizada A. M., Yetirmishli G. D., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Rzaev A. G. Intelligence seismoacoustic system of monitoring of the beginning of origin of abnormal seismic processes. Intelligent Monitoring System seismo beginning of nucleation of abnormal seismic processes // Seismic Instruments. 2010. V. 46. N 1. P. 27—41. (in Russian).
3. Aliev T. A., Musaeva N. F. and Sattarova U. E. Robust technologies for calculating normalized correlation functions // Cybernetics and Systems Analysis. Springer New York. 2010. N 1. P. 153—166.
4. Aliev T. A., Guluyev G. A., Rzaev A. G., Jusifov I. B. Mathematical modelling nanotechnology processes in preparation of oil // Oil refining and Petrochemistry, 2010. N 4. P. 26—29. (in Russian).
5. Вердиев Т. М. Теоретические основы проектирования скважинной штанговой насосной установки. Баку: ЭЛМ, 2000. 88 с.
6. Блочно-модульная станция управления БМС-1. ОКБ Нефтяного приборостроения. URL: www.okbnp.ru/catalog/...i.../blok_kontrolja_i_upravljenija_kub_2000.html
7. Интеллектуализация устройств защиты асинхронных двигателей станков-качалок // Тр. II республ. науч. конф. "Современные проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий". Баку, 2004. Т. 1. С. 111.
8. Станция управления МИР СУ — 03. URL: www.vigen-electro.ru/prod.html
9. Станция управления ШГН "Интел-СУС". URL: www.grant-ufa.ru/publications/Hakimjyanov_Kovshov_Svetlakov_2.pdf
10. Локальная станция оптимального управления установкой штангового глубинного насоса ЛСОУ-УШГН ОАО "Завод Промавтоматика". URL: <http://promavt.com/>
11. Станция управления станками-качалками "Ангара". URL: www.enm.oms.ru/products.htm

УДК 004.942:621.3:519.24

Э. Р. Алиев, канд. техн. наук, зав. лаб.,

Elchin@sinam.net,

Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана

Комплексная информационная система мониторинга жилых зданий и социально-значимых объектов

Предлагается структура комплексной информационной системы технического мониторинга строительных объектов. В качестве ключевого элемента блока систематизации данных, полученных из датчиков, рассматривается структурированная нейросетевая модель, агрегирующая данные мониторинга для определения наличия деструктивных изменений в несущих конструкциях строительных сооружений.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, структурированная нейросетевая модель, feed forward нейронная сеть

Введение

Создание системы мониторинга жилых зданий и социально-значимых объектов сегодня является одной из первоочередных задач градостроения. Последние достижения в области развития информационных технологий позволяют использовать самый разнообразный пакет инструментариев, отвечающих современным требованиям безопасности и принятия оперативных решений. В ведущих мировых профильных научно-исследовательских и опытно-конструкторских центрах проводятся интенсивные исследования по разработке и внедрению различных автономных информационных систем технического мониторинга строительных объектов (ТМСО) [1]. Для надежного отслеживания процесса зарождения и развития деструктивных изменений в несущих конструкциях сооружений наряду с совершенствованием элементов индикации (датчиков) стали активно применяться интеллектуальные средства обработки информации. Такими средствами в современных информационных технологиях являются

ся нейронные сети, объединение которых с методами и моделями нечеткой математики и логики, генетического и эволюционного программирования даст возможность создать новые аппаратные и программные средства, которые позволяют существенно продвинуться в разработке интеллектуальных информационных систем ТМСО.

Как известно, основными аспектами, влияющими на разработку систем ТМСО и потому находящимися в центре внимания их разработчиков, являются:

- технический, предусматривающий выявление физико-технических принципов измерений;
- технологический, подразумевающий, собственно, разработку, монтаж и эксплуатацию системы;
- экономический, устанавливающий финансовую эффективность от внедрения системы.

Предметом рассмотрения данной статьи является технологический аспект, который является ключевым при создании систем ТМСО. В рамках этого аспекта глобальная информационная система ТМСО представляет собой совокупность трех основных составляющих: преобразователя физической величины, электронного блока обработки и блока систематизации данных.

Из-за разнотипности большого числа измерительных систем доступная информация требует создания унифицированной системы обработки данных. Используемые при создании систем ТМСО информационные и математические модели или принципиально не могут быть получены, или же их получение связано с неоправданными материально-техническими затратами. Поэтому для таких систем, по-видимому, единственно возможной моделью может быть "черный ящик" или, при определенных ограничениях, "серый ящик". В подобных случаях нейронные сети могут быть эффективным средством для идентификации деструктивных изменений в несущих конструкциях и прогнозирования их развития. Кроме того, использование нейронных сетей позволяет электронному блоку обработки сигналов легко адаптироваться к возможному расширению базовой системы объектов мониторинга. Поэтому для достижения цели мониторинга строительных объектов предлагается разработка интеллектуальной информационной системы ТМСО на базе применения многослойных нейронных сетей.

Концепция информационной системы ТМСО: цели и задачи

Прежде чем создавать глобальную информационную систему ТМСО, первым делом необходимо четко сформулировать ее основную цель, а именно: создать систему ТМСО в базовом варианте, который предусматривает, как минимум, технический контроль всех жилых зданий и социально-значимых объектов. При этом ключевым элементом мониторинга должно быть обеспечение контроля основных параметров, отвечающих за наиболее рас-

пространенные причины потенциальных аварий. По мере расширения базовой системы объектов мониторинга, вызванного увеличением числа точек контроля, видов контролируемых конструкций и списка контролируемых параметров, система ТМСО должна уметь соответствующим образом адаптироваться к новым условиям. Поэтому глобальная информационная система ТМСО должна содержать: измерительный блок, построенный на базовом физическом принципе, и легко адаптируемый электронный блок обработки сигналов. Для достижения этой цели предлагается структура глобальной комплексной информационной системы ТМСО (рис. 1).

В качестве базового датчика, фиксирующего деструктивные изменения в несущих конструкциях, можно воспользоваться амплитудным волоконно-оптическим датчиком, который устанавливается внутрь вместе с заливкой железобетонной конструкции или крепится на поверхности строительных элементов [2]. Дополнительно можно подключить волоконно-оптический датчик температуры, миниатюрность чувствительного элемента которого позволяет монтировать его в самых труднодоступных местах, в том числе внутри железобетонных конструкций.

Процесс установки датчиков регламентируется на стадии проекта. Контроль может вестись как в течение монтажа, так и во время эксплуатации сооружения¹.

Электронный блок обработки сигналов получает постоянную информацию от датчиков о состоянии конструкции во внутренних и внешних точках контроля. Сопоставление этой информации с проектными данными в режиме on-line позволяет делать выводы о текущем состоянии конструкции. При этом анализ проводится путем нейронной диагностики состояния сооружения на основании закладываемых в расчет реально измеренных данных. Полученный результат позволяет понять, как деформировалось здание в целом. Важно отметить, что информация получается только по локальным деформациям, а выводы можно сделать по результатам изменения параметров здания в целом.

Полученная система является примером унификации по базовому физическому принципу, технологиям изготовления и монтажа. При этом разнообразие механизмов преобразования физических величин на базе волоконной оптики позволяет охватывать весь спектр параметров, которые необходимо контролировать в строительстве. Для социально-значимых объектов или высотных зданий число датчиков может быть увеличено. Используемый в системе электронный блок передачи и обработки сигналов имеет унифицированную структуру. Пе-

¹ Практика градостроения показывает, что повреждения и дефекты в несущих конструкциях сооружений на 50 % и более возникают на стадии строительства, на 20 % — на стадии эксплуатации и на 30 % — из-за ошибок в геологических исследованиях и проектировании.

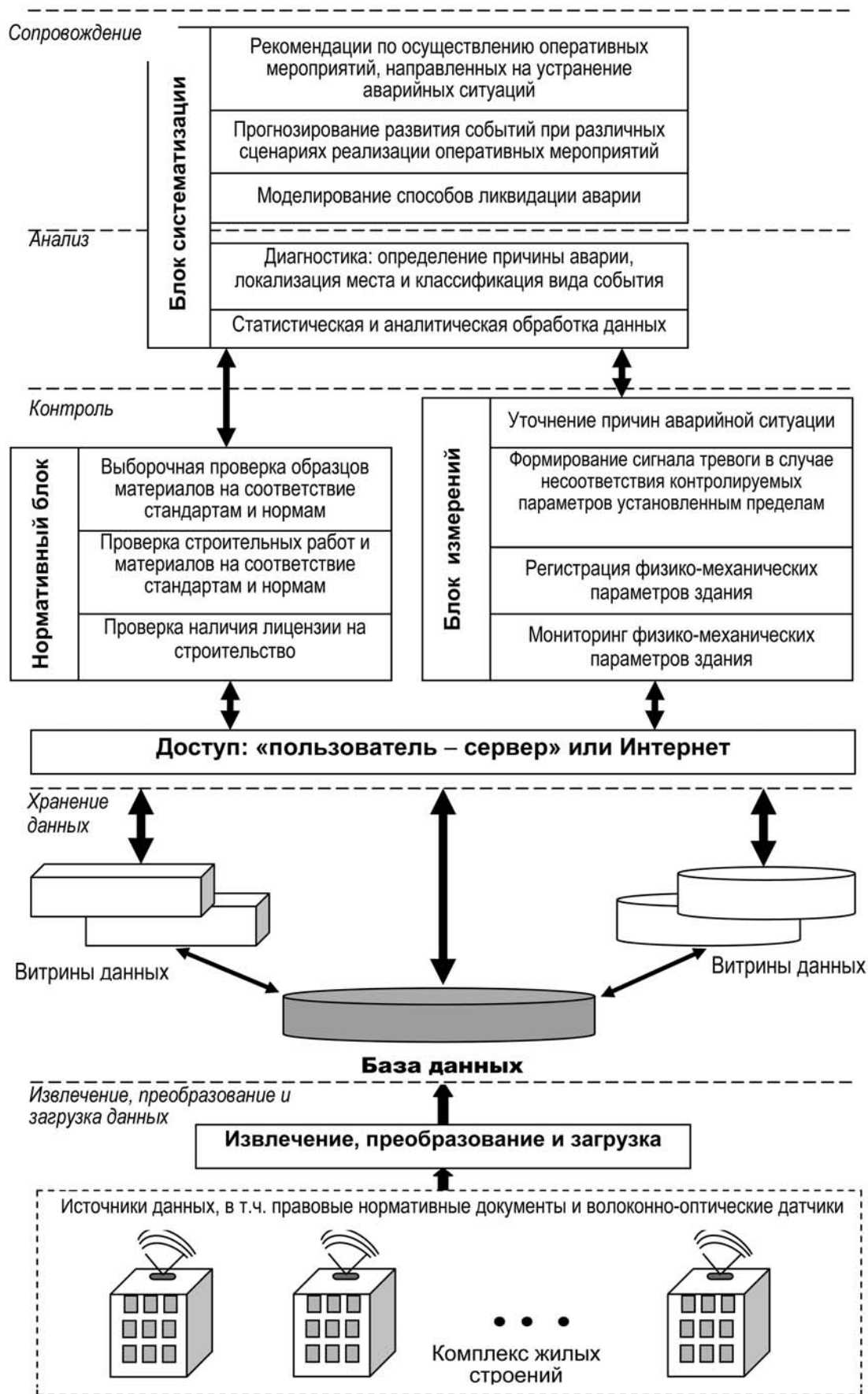


Рис. 1. Структура глобальной комплексной информационной системы TMCO

передача сигналов может осуществляться в беспроводном формате, например через сеть Интернет, и, следовательно, не требует дополнительных работ по оборудованию каналов связи.

Блок систематизации: нейронная диагностика состояния несущих конструкций строительных объектов

Традиционные подходы к автоматизированному мониторингу строительных объектов подразумевают подключение к используемым датчикам цифровых устройств сбора сигналов для передачи их в цифровом формате на головной компьютер с использованием беспроводного интерфейса. При этом беспроводные узлы формируют самонастраивающуюся сеть благодаря "защиту" в них системному программному обеспечению. Сенсорные данные о текущем состоянии объекта передаются через *шлюз-координатор* на центральный сервер, после чего данные записываются в базу данных, благодаря которой можно формировать отчеты и обеспечивать интеграцию с соответствующими инженерными пакетами. Доступ к серверу осуществляется посредством Web-интерфейса, обеспечивающего круглосуточный удаленный доступ к данным из любой точки.

Одним из возможных средств обработки сигналов с беспроводных узлов может являться многослойная нейронная сеть, которая, являясь гибким информационным процессором, достигает определенного преимущества за счет параллельной обработки сигналов и способности к самообучению. Нейронные сети достаточно хорошо изучены и широко применяются в различных областях, таких как управление [3, 4], распознавание образов [5, 6] и обработка знаний [7].

Строительный мониторинг является комплексным мероприятием и подразумевает одновременную обработку большого числа сигналов, поступающих с различных датчиков. В отличие от обычных компьютерных процессоров, выполняющих все операции в последовательном режиме, нейросетевые структуры способны одновременно обрабатывать

большие массивы информации из многочисленных источников, обладают достаточными степенями свободы и могут учитывать различные нелинейные факторы. Поэтому для получения и оперативной обработки информации от датчиков предлагается использовать структурируемую нейросетевую модель для агрегирования, собственно, результатов мониторинга по каждому объекту в отдельности.

Нейросетевая модель для мониторинга технического состояния здания

На рис. 2 показана многослойная и многосвязная трехслойная *feed forward* нейронная сеть, которая после обучения может исполнять роль необходимого преобразователя (конвертора) сигналов. Сеть конвертирует входные сигналы с учетом весов своих связей. В процессе обучения эти весовые коэффициенты настраиваются так, чтобы на своем выходе нейронная сеть индуцировала желаемые выходы. Процесс начинается с произвольного выбора весов, и поэтому в начале выходы нейронной сети будут заметно отличаться от желаемых. Сравнивая свои текущие выходы с соответствующими желаемыми, сеть настраивает веса своих связей так, чтобы уменьшить эту разницу. Собственно, это и составляет основу обучения нейронной сети [4] на базе так называемого метода обратного распространения ошибки (*error back propagation*).

Благодаря своим интерполяционным свойствам и способности к обучению данная сеть является достаточно гибкой. Посредством обучения она может воссоздавать и изменять свои функции, а за счет своих интерполяционных возможностей может адекватно реагировать на не учтенные в процессе обучения условия.

Тем не менее, предлагаемая нейронная сеть может реагировать только на статичную входную-выходную связь в заданный момент времени. Поэтому необходим дополнительный процесс, который на протяжении определенного интервала времени мог бы учитывать динамические связи между изменяющимися во времени входными и рядом выходных образцов. Другими словами, для хранения

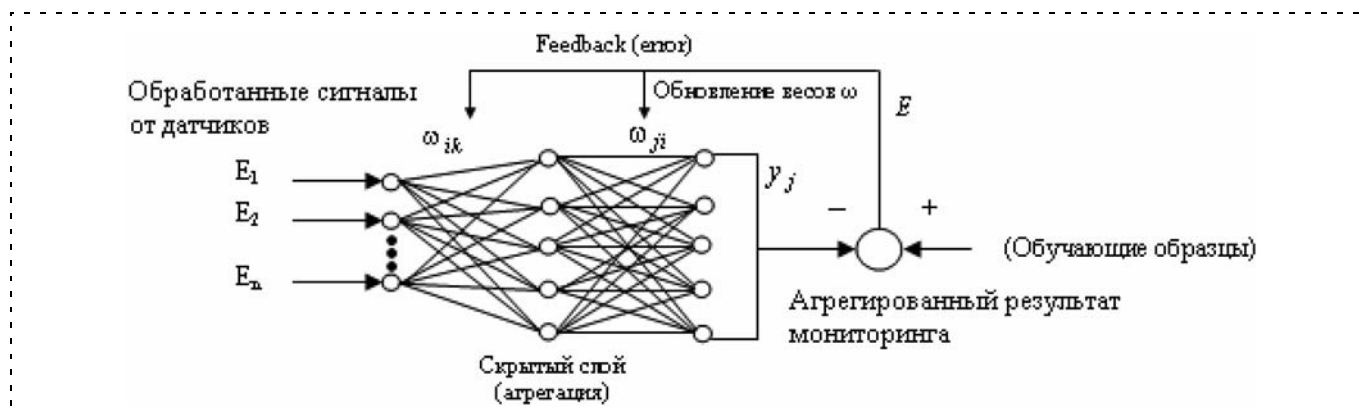


Рис. 2. Трехслойная *feed forward* нейронная сеть

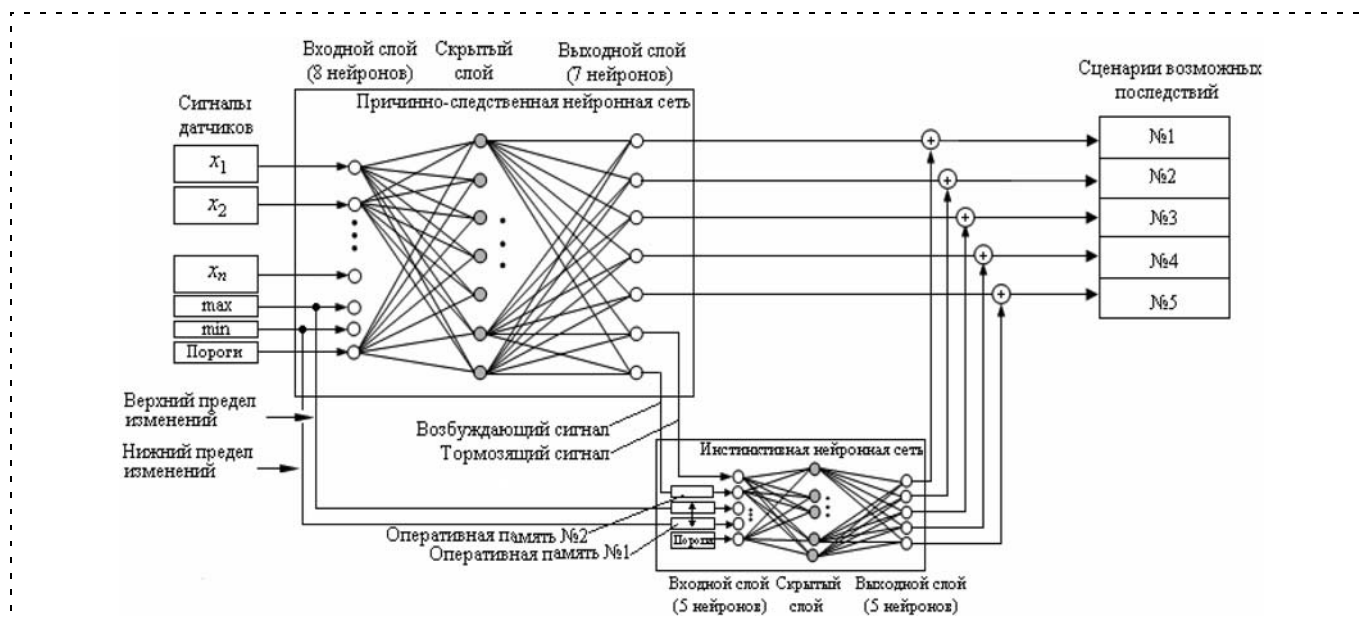


Рис. 3. Структурированная нейросетевая модель для диагностирования деструктивных изменений в несущих конструкциях сооружения

вычисленных сигналов, соответствующих имеющимся входным образцам, необходимы дополнительные узлы памяти. Однако это сделает нейронную сеть очень громоздкой и значительно замедлит процесс ее обучения.

Для обеспечения тотального мониторинга технического состояния высотного здания в рамках предлагаемого подхода адаптирована структурированная нейросетевая модель (рис. 3), которая устанавливает ряд обобщенных оценок в отношении технического состояния сооружения. Эта модель комбинирует в себе два типа трехслойных нейронных сетей: причинно-следственную и инстинктивную. Входные сигналы, поступающие от датчиков, и итоговые выходные сигналы нейросетевой модели являются бинарными (0 или 1). Индуцируемые сетью выходные бинарные сигналы диагностируют наличие или отсутствие аномалий в несущих конструкциях здания. Сигналы от датчиков напрямую поступают на входной слой причинно-следственной нейронной сети, которая определяет их соответствие установленным значениям и индуцирует на своем выходе соответствующий результат. Например, если датчиками не зафиксированы какие-либо отклонения от установленных порогов, то система продолжает работать в привычном режиме.

В свою очередь, инстинктивная нейронная сеть проверяет сигналы датчиков на их соответствие с рядом уже известных сценариев. Например, если датчики посылают "знакомые" сигналы, то инстинктивная сеть диагностирует уже известные соответствующие им состояния сооружения. Поэтому инстинктивная нейронная сеть играет ключевую роль в процессе выработки оперативного решения относительно прогнозирования возможных деструктивных изменений в несущих конструкциях сооружения.

Инстинктивная сеть имеет три узла оперативной памяти, два из которых обладают взаимно тормозящими соединениями. Узел оперативной памяти хранит возбуждающее или тормозящее состояние на определенный период времени. Как показано на рис. 3, некоторые выходные нейроны причинно-следственной сети связаны с инстинктивной сетью посредством соединений, через которые передаются возбуждающие и тормозящие сигналы. При поступлении с датчиков "знакомых" входных сигналов тормозящий сигнал из причинно-следственной сети к инстинктивной сети сбрасывается. В этом случае из причинно-следственной нейронной сети через второй узел оперативной памяти в инстинктивную сеть передается возбуждающий сигнал, который активирует инстинктивную сеть, принуждая ее принять на себя управление на определенный период времени. Инстинктивная сеть со свойственной ей манерой начинает работать по привычным (обученным) сценариям: мгновенно обрабатывает уже знакомые сигналы и индуцирует на своем выходе агрегированный результат.

Таким образом, при поступлении с датчиков "незнакомых" сигналов система эксплуатирует причинно-следственную нейронную сеть, которая, блокируя работу инстинктивной сети, комбинирует сигналы датчиков в соответствующий сценарий последствия. В противном случае, т. е. тогда, когда взвешенные сигналы датчиков попадут в интервал, из которого в свое время были выбраны обучающие образцы, система замкнется на инстинктивной нейронной сети, которая намного быстрее выдаст агрегированный результат. По существу, причинно-следственная нейронная сеть исполняет роль экстраполятора, а инстинктивная — интерполятора.

Не трудно заметить, что для выполнения процедуры агрегирования можно было бы ограничить-

ся только одной нейронной сетью, исполняющей одновременно роли интерполятора и экстраполятора. Однако в этом случае для получения адекватных агрегированных оценок текущего технического состояния сооружения потребовалось бы использовать большую по размерам сеть (т. е. увеличить число нелинейных нейронов в "скрытом" слое), обуславливающую наличие сравнительно большего числа параметров (весовых коэффициентов синоптических связей и порогов нелинейных нейронов из скрытого слоя), для необходимой настройки которых пришлось бы заметно расширить множество обучающих образцов. Естественно, все это существенно замедлит процедуру обучения нейронной сети и, в конечном итоге, сделает сам процесс агрегирования оценки малоэффективным.

В рамках предлагаемого подхода удастся, во-первых, предельно упростить конфигурации нейронных сетей, сведя к необходимому и достаточному минимуму число нелинейных нейронов из их скрытых слоев, и, во-вторых, без дополнительной траты времени на обучение оперативно реагировать на "знакомые" сигналы датчиков. В результате, за сравнительно короткие сроки можно получить адекватную агрегированную оценку текущего технического состояния сооружения.

Для более эффективного обучения правильному поведению необходимо рассматривать обучающие образцы в комбинации, что обеспечит нейросетевой системе агрегирования (НСА) "разумное" функционирование на основе минимального числа обучающих образцов. НСА может содержать сравнительно малое число нейронов, так как она комбинирует в себе два типа нейронных сетей. В противном случае, общее число комбинаций входных бинарных сигналов, необходимых для полновесной настройки НСА, составит гигантское число $2^n + 2$, что, существенно замедляя процесс обучения, в конечном итоге приведет к информационному коллапсу системы в целом.

Как известно, основным преимуществом нейронной сети является то, что для ее обучения достаточно подобрать минимум типовых обучающих образцов. Поэтому НСА может индуцировать адекватные различным условиям и средам сигналы посредством навыков, приобретенных после типового обучения. На рис. 4 представлена схема трехфазовой идентификации нейросетевой модели системы агрегирования сигналов (САС), предусматривающая использование обучающих и тестовых выборок. Первая используется непосредственно для обучения, а вторая служит для контроля качества обучения.

На первой фазе формируется обучающая выборка, необходимая для настройки параметров нейросетевой модели САС (рис. 4).

На второй фазе с помощью тестовой выборки проверяется адекватность функционирования САС (рис. 5). В случае успешного тестирования, уже на третьей фазе устанавливаются оптимальные значе-

ния для параметров нейросетевой модели, после загрузки которых система переходит в автономный режим функционирования. Если при этом не наблюдаются какие-либо нарушения, то процесс обучения можно считать завершенным.

Адекватность нейросетевой модели проверяется посредством сравнения среднеквадратичного отклонения

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s (y_j - y_j^{\text{net}})^2, \text{ где } s — \text{число проводимых экспериментов с допустимой идентификационной ошибкой } e.$$

Если в процессе функционирования САС не адекватно реагирует на незнакомый вектор-сигнал из датчиков, то этот сигнал вместе с соответствующим ему желаемым выходом добавляется в обучающую выборку.

Предлагаемый метод обучения существенно повышает эффективность, поскольку предусматривает обучение по весьма ограниченному набору поведенческих примеров, которые за короткое время легко могут быть модифицированы под различные условия и задачи. Кроме того, декомпозиционная структура нейросетевой модели позволяет обучать подсети независимо друг от друга, что значительно сокращает время, отводимое на обучение.

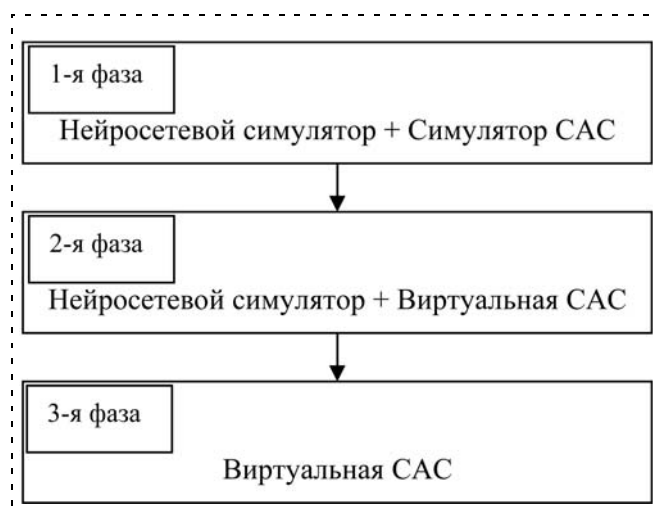


Рис. 4. Трехфазовая идентификация нейросетевой модели САС

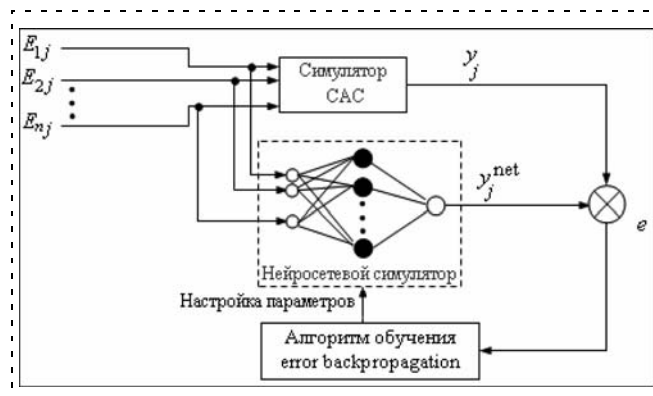


Рис. 5. Схема нейронной идентификации САС

Заключение

Предложенная комплексная информационная система ТМСО, основанная на применении многослойных нейронных сетей, может быть отнесена к новому поколению интеллектуальных систем мониторинга строительных сооружений, отличающихся способностями к самоорганизации и адаптации к возможному расширению базовой системы объектов мониторинга. Комбинированное использование в составе системы двух нейронных сетей позволяет поддерживать динамический процесс мониторинга сооружения и в автономном режиме оперативно реагировать на возможные изменения в показаниях датчиков.

Из-за разнотипности большого числа измерительных систем доступная информация требует создания унифицированной системы обработки данных. Более того, существующие алгоритмы обработки информации, как правило, работают с "чистыми" данными, т. е. данными, представленными в виде чисел. Однако в реальности данные, поступающие от измерительных приборов, которые при всем своем совершенстве не могут считаться абсолютными, должны рассматриваться, в общем случае, слабо структурированными или даже неструктурированными, т. е. такими, о которых известна их принадлежность к определенному типу. Например, дан-

ные могут быть заданы интервально $x \in [x^{\min}, x^{\max}]$ или в виде утверждений типа "x близко к $\tilde{5}$ ", т. е. в виде нечеткого множества. Поэтому следующим шагом в развитии информационной системы ТМСО могли бы стать нечеткие модели обработки данных, способные более адекватно учитывать специфику и разнородность доступной информации.

Список литературы

1. Неугольников А. П. Опыт реализации систем мониторинга напряженно-деформированного состояния высотных зданий: разработка, проектирование, монтаж, сопровождение // XVIII Междунар. спец. выставка "Форум Уралстройиндустрия-2008". Матер. сем. "Проблемы высотного строительства в республике Башкортостан", 2008. С. 89–94.
2. Егоров Ф. А., Неугольников А. П., Поспелов В. И. Контроль и диагностика параметров строительных сооружений с помощью волоконно-оптических систем мониторинга // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6. С. 47–53.
3. Miyamoto H., Kawato M., Setoyama T., and Suzuki R. Feed-back-Error-Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator // Neural Networks. 1988. V. 1. N 3. P. 251–265.
4. Barto G., Sutton R. S., and Anderson C. W. Neuronlike Adaptive Elements That Can Solve Difficult Learning Control Problems // IEEE Trans Syst., Man., Cybern. 1983. V. SMC-13. P. 834–846.
5. Widrow B. and Winter R. Neural Nets for Adaptive Filtering and Adaptive Recognition // Computer. V. 21. N 3. P. 25–39.
6. Grossberg S. Competitive Learning: From Interactive Activation to Adaptive Resonance // Cognitive Science. 1987. V. 11. P. 23–63.
7. Leven S. J., and Levine D. S. Effects of Reinforcement of Knowledge Retrieval and Evaluation // Proc. 1st IEEE ICNN. 1987. P. 2269–2277.

УДК 622.244.6; 004.31; 004.91

Г. А. Гулуев, канд. техн. наук, директор СКБ,
scb_06@mail.ru,

А. Г. Рзаев, канд. техн. наук, зав. лаб.,

И. Р. Саттаров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Институт кибернетики

Национальной академии наук Азербайджана,

И. Б. Юсифов, региональный директор,
Shirvan Operating Committee Limited

Комбинированный способ измерения дебита нефтяных скважин

Обсуждается разработка комбинированного способа измерения дебита нефти, включающего в себя измерение веса жидкости в мернике пьезометрическим методом и объема с помощью расходомера при сливе жидкости из мерника.

Ключевые слова: дебит нефти, групповой мерник, трап, пьезометрический метод, микроконтроллер

Введение. В последние годы проделаны важные теоретические работы по обработке сигналов циклических процессов, где применение робастных алгоритмов, частотно-избыточных технологий и технологии анализа помех позволяет выявлять де-

фекты на стадии их зарождения, что обеспечивает своевременное предотвращение серьезных аварий. Использование результатов этих работ при разработке и создании новых средств измерения может существенно улучшить их характеристики [1–4].

Одним из важнейших показателей работы нефтяного пласта является среднесуточный дебит, по которому устанавливается технологический регламент—режим отбора нефти по скважинам. Только точное знание этой величины по каждой конкретной скважине позволяет сделать вывод о правильной работе системы "пласт-скважина — добывающее оборудование", делать прогнозы и планировать необходимые профилактические работы, которые позволяют в дальнейшем избежать аварийных ситуаций а следовательно, дорогостоящих ремонтов и остановки добычи нефти. Определение производительности (дебита нефти и газа) нефтяных и газовых скважин в процессе эксплуатации нефтяных и нефтегазовых месторождений является одной из самых сложных и актуальных задач обеспечения разработки месторождений [5].

Традиционными средствами определения дебита скважин являются сепарационные измерительные установки с предварительной сепарацией продукции и последующим определением ее количества через

замерные установки, замерные сепараторы, групповые замерные установки (ГЗУ) типа "СПУТНИК", трапы, мерники и др. Измерения с их помощью позволяют определить раздельно расход жидкости и газа. Вследствие рассредоточенности скважин для измерения их дебита наиболее эффективно применение групповых замерных установок, включенных в систему централизованного контроля.

Одним из примеров таких систем является автоматизированный групповой мерник (АГМ-3) [6, 7].

Технологическая схема АГМ-3 приведена на рис. 1. Система АГМ-3 разработана в 60-е годы прошлого века и с небольшими модернизациями до сих пор эксплуатируется в нефтяных промыслах республик Азербайджана и Туркменистана.

Скважина, дебит которой необходимо замерить с помощью манифолдных пневматических вентилей, подключается к замерному мернику в течение определенного времени ΔT . По истечении времени ΔT скважина отключается от мерника и подключается к общему коллектору. Ожидается время, необходимое для отстоя жидкости и выделения нефть—вода, после чего измеряется уровень столба воды и нефти с помощью измерителя высоты, принцип которого заключается в следующем. Груз с определенной постоянной скоростью C поднимается со дна мерника, и фиксируются промежутки времени достижения грузом поплавков, размещенных в разделе вода—нефть ($\Delta\tau_{\text{в}}$) и нефть—газовое пространство ($\Delta\tau_{\text{ж}}$). Затем определяется суточный объемный дебит общей жидкости и нефти по следующим формулам:

$$Q_{\text{об.ж}} = 24 \cdot \frac{V_{\text{об.ж}}}{\Delta T} = 24 \cdot \frac{C \Delta\tau_{\text{ж}} S}{\Delta T};$$

$$Q_{\text{н}} = 24 \cdot \frac{V_{\text{н}}}{\Delta T} = 24 \cdot \frac{V_{\text{об.ж}} - V_{\text{в}}}{\Delta T} = 24 \cdot \frac{C(\Delta\tau_{\text{ж}} - \Delta\tau_{\text{в}}) S}{\Delta T},$$

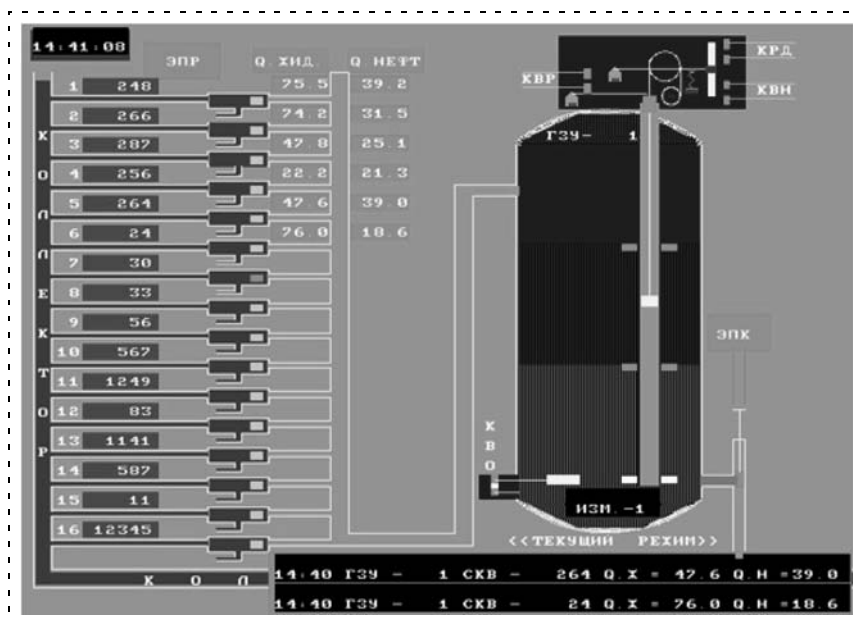


Рис. 1. Технологическая схема АГМ-3

где S — площадь поперечного сечения замерной емкости в м^2 ; $V_{\text{об.ж}}$, $V_{\text{в}}$ — объем общей жидкости и воды в мернике соответственно, м^3 ; C — скорость вертикального движения груза, м/с ; $\Delta\tau_{\text{в}}$ и $\Delta\tau_{\text{ж}}$ — промежутки времени, за которые груз поднимается со дна мерника до раздела вода—нефть и до нефть—газовое пространство соответственно, с.

Однако необходимо отметить, что установленные на этой технологической схеме средства автоматизации и измерительной техники морально устарели, в промышленности их запасные части давно не выпускаются. Вместе с тем, эксплуатация поплавковой системы измерения очень затруднительна из-за того, что она размещается внутри емкости и непосредственно контактирует с измеряемой жидкостью. Налипание на поплавки парафина, смолы, а иногда и песка, ухудшает метрологические характеристики этого способа. Поэтому очень часто приходится либо останавливать АГМ-3 на трудоемкие профилактические работы, либо же ограничиваться грубым измерением количества только общей жидкости.

Таким образом, поддерживать АГМ-3 в рабочем состоянии практически очень затруднительно. В результате или промысел остается без автоматического замера, или существующие групповые замерные установки дают большую погрешность измерений, особенно при малых дебитах скважин.

При модернизации автоматизированной групповой замерной установки (АГЗУ) "СПУТНИК" определенные успехи были достигнуты Акционерным обществом ОЗНА (Октябрьским заводом нефтяной аппаратуры). Разработанные им автоматизированные групповые замерные установки "СПУТНИК", оснащенные современным оборудованием измерительной техники и использующие информационные технологии, имеют улучшенные, по сравнению с их

предшественником, метрологические характеристики [8]. Однако они очень дорогостоящи, и экономически их применение в местах, где уже существуют установки АГМ-3, невыгодно, так как гораздо дешевле модернизировать имеющиеся на промыслах технологические схемы АГМ-3 на базе современных средств автоматики, измерительной техники и информационных технологий.

Таким образом, проведение работ по усовершенствованию измерений дебита нефтяных скважин является актуальной задачей.

Постановка задачи. Ставится задача разработки комбинированного варианта измерения количества общей жидкости скважин (массы в емкости пьезометрическим способом, а объема — с помощью счетчика расхода) и опре-

деления количества нефти и воды расчетным путем на микроконтроллере, что позволит упростить эксплуатацию групповых измерительных установок типа "Трап" и улучшить метрологические характеристики системы измерения.

Технология измерения дебита нефтяных скважин.

На рис. 2 приведена технологическая схема АГЗУ на основе комбинированного способа измерения дебита нефти, включающего в себя измерение массы жидкости пьезометрическим способом по мере накопления в мернике, а объема — с помощью расходомера при сливе жидкости из мерника. Она предусматривает модернизацию существующих на промыслах АГМ-3 и отличается тем, что система измерения поплавкового типа У6-М заменена на измерители расхода 6, давления 7, перепада давления 8 и температуры 9, а устройство управления ГЗУ "Трап", включающее в себя контроллер "Трап" и измеритель расхода газа ИРГ, разработано на базе современных микроконтроллеров.

АГЗУ осуществляет замер дебита скважин в два этапа.

На первом этапе, подключая конкретную скважину к замерной емкости, контроллер запускает таймер времени замера i -й скважины τ_i . Замеряется выход датчика перепада давления ($\Delta P_{\text{ж}j}$) в момент

времени τ_j и вычисляется масса жидкости по формуле

$$G_{\text{ж}j} = S \Delta P_{\text{ж}j}. \quad (1)$$

Высота столба жидкости вычисляется по формуле

$$H_{\text{ж}j} = \frac{G_{\text{ж}j}}{\rho_{\text{ж.о}} S} = \frac{\Delta P_{\text{ж}j}}{\rho_{\text{ж.о}}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ж.о}}$ — ориентировочная плотность жидкости.

Вычисление по формулам (1) и (2) продолжается до достижения $\tau_j \geq \tau_i$ или $H_{\text{ж}j} \geq H_{\text{lim}}$. При достижении одного из условий принимается $G_{\text{ж}i} = G_{\text{ж}j}$ и осуществляется отключение скважины от замерного мерника.

На втором этапе открывается электропневматический клапан для опустошения мерника. При этом дается разрешение на суммирование импульсов расходомера, т. е. определяется объем жидкости $V_{\text{ж}}$. После известной температурной коррекции

$$V_{\text{ж.Т}} = V_{\text{ж}}(1 - \alpha T);$$

точное значение плотности жидкости данной i -й скважины определяется как

$$\rho_{\text{ж}i} = \frac{G_{\text{ж}i}}{V_{\text{ж.Т}}}.$$

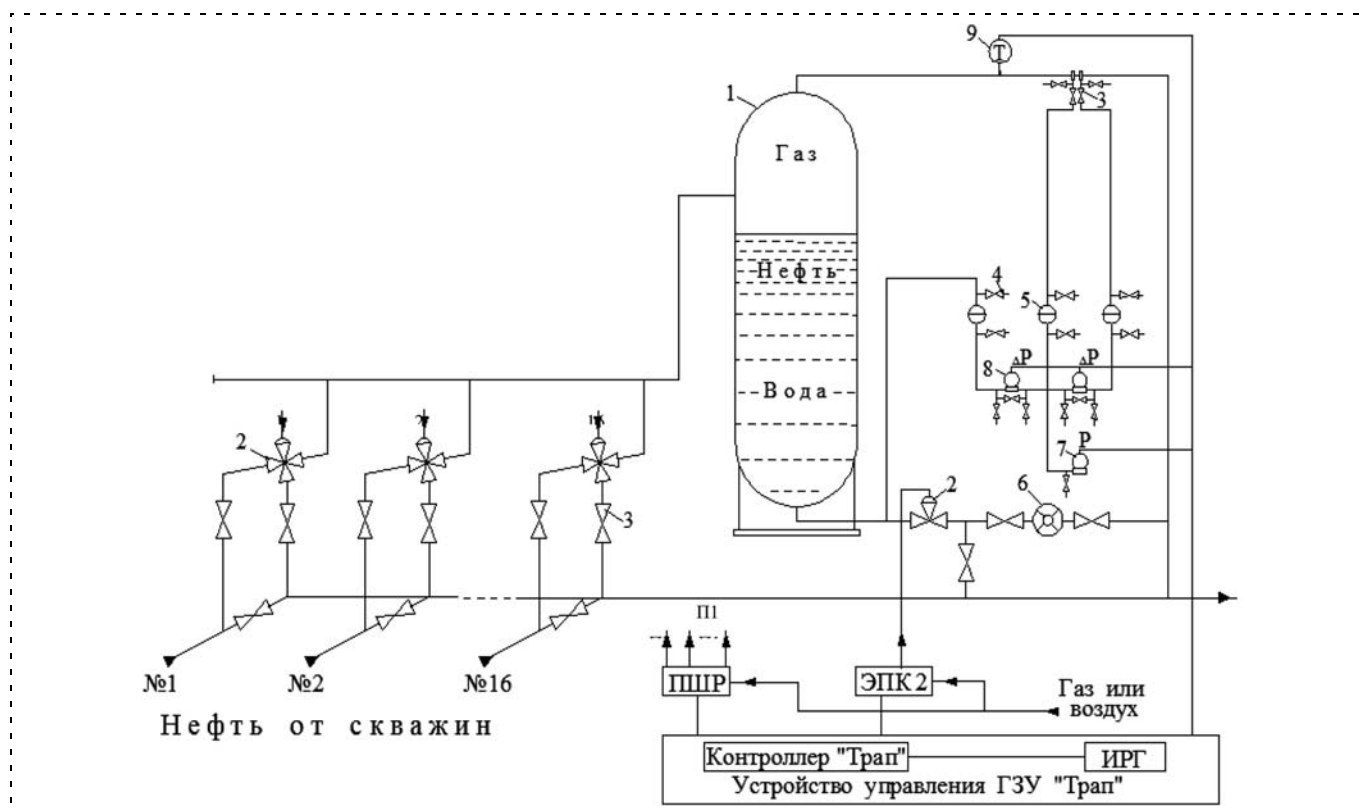


Рис. 2. Технологическая схема автоматизированной групповой замерной установки на основе пьезометрического способа:

1 — трап; 2 — управляющие вентили; 3 — запорные вентили; 4 — продувочные вентили; 5 — отстойные сосуды; 6 — расходомер; 7 — преобразователь давления с вентильным блоком; 8 — преобразователь перепада давления с вентильным блоком; 9 — преобразователь температуры; ПШР переключатель шагового распределителя; КТ — контроллер "Трап"; ИРГ — измеритель расхода газа; УУ ГЗУ — устройство управления ГЗУ "Трап"

Известно, что при смешивании двух жидкостей плотность смеси подчиняется аддитивному закону. С учетом этого, доля нефти в общей жидкости определяется как

$$K_H = \frac{\rho_B - \rho_{жi}}{\rho_B - \rho_H},$$

где ρ_B и ρ_H — полученные в результате лабораторного анализа плотности воды и нефти соответственно.

Тогда массы нефти и воды соответственно будут определены как

$$G_{Hi} = G_{жi} K_H;$$

$$G_{Bi} = G_{жi} (1 - K_H).$$

Дебит нефти и воды за час и за сутки (в тоннах) составляет, соответственно:

$$G_{Hi/ч} = \frac{G_{Hi}}{\tau_i} \text{ (т/ч)};$$

$$G_{Hi/сут} = 24 G_{Hi/ч};$$

$$G_{Bi} = \frac{G_B}{\tau_i} \text{ (т/ч)};$$

$$G_{Bi/сут} = 24 G_{Bi/ч}.$$

Дебит газа измеряется согласно методике выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств [9].

Этот процесс циклически продолжается для всех скважин, подключенных к АГЗУ поочередно в автоматическом режиме.

Применение пьезометрического способа измерения столба жидкости в замерной емкости АГЗУ по сравнению с поплавковым способом измерения дает следующие преимущества:

- все измерительные приборы установлены вне мерника, что облегчает эксплуатацию измерительных приборов;

- после заполнения мерника время отстоя для разделения "нефть—вода" не требуется, и за счет сокращения времени отстоя частота замера скважин повышается, что в интегральном значении замера скважин улучшает точность измерения;
- во время наполнения мерника имеется возможность измерить количество жидкости через определенные интервалы времени и построить характеристику $G_{ж} = f(t)$, что, в свою очередь, характеризует подачу глубинного насоса во времени.

Выводы. Таким образом, предложенный комбинированный способ измерения дебита нефтяных скважин упрощает технологическую схему, облегчает эксплуатацию измерительных приборов и, в целом, улучшает метрологические характеристики системы измерения.

Список литературы

1. Aliev T. A. Digital Noise Monitoring of Defect Origin. Springer-Verlag, London, 2007. 235 p.
2. Aliev T. A., Alizada A. M., Yetirmishli G. D., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Rzayev A. G. Intelligence seismoacoustic system of monitoring of the beginning of origin of abnormal seismic processes // Seismic Instruments. 2010. V. 46. N 1. P. 27—41. (in Russian).
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., and Sattarova U. E. Robust technologies for calculating normalized correlation functions // Cybernetics and Systems Analysis. Springer New York. 2010. N 1. P. 153—166.
4. Aliev T. A., Guluyev G. A., Rzaev A. G., Jusifov I. B. Mathematical modelling nanotechnology processes in preparation of oil // Oil refining and Petrochemistry. 2010. N 4. P. 26—29. (in Russian).
5. Райкевич С. И. Нетрадиционные способы определения производительности скважин на нефтегазовых месторождениях // Междунар. технолог. симпозиум "Интенсификация добычи нефти и газа", Москва, 26—28 марта 2003 г.
6. Алиев Т. М. и др. Информационные системы в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1972. С. 240.
7. Ковшов В. Д. Автоматизация технологических процессов. М.: "Нефть-газ", 1994. С. 132.
8. Групповая замерная установка типа "СПУТНИК". URL: www.ozna.ru.
9. РД-50-411—83. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств. М.: Издательство стандартов, 1984. С. 52.

ИНФОРМАЦИЯ

30 января — 2 февраля 2012 г.
в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

IX Международная конференция "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'12)

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Структурная идентификация
- ◆ Параметрическая идентификация
- ◆ Непараметрическая идентификация
- ◆ Интеллектуальные методы идентификации
- ◆ Обработка сигналов
- ◆ Стохастические системы
- ◆ Адаптивные и робастные системы
- ◆ Методы оптимизации
- ◆ Приложения методов идентификации

Подробную информацию см. на сайте конференции:
<http://sicpro.org>

УДК 621.865.8

В. В. Серебрянный,

канд. техн. наук, директор производства
технологического оборудования и оснастки,
vsereb@vaz.ru,

Д. Е. Рыбальченко, канд. техн. наук, нач. отдела,
D.Rybaltchenko@vaz.ru,
ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти

Перспективы развития отечественного роботостроения

Выполнен анализ рынка промышленных роботов в развитых странах. Приведена информация об одном из основных отечественных производителей роботов и робототехнических устройств. Дана оценка основных тенденций развития отечественного роботостроения.

Ключевые слова: робототехника, промышленные роботы, роботостроение в России, анализ рынка, ОАО "АВТОВАЗ"

По данным международной федерации робототехники ежегодный объем мирового рынка промышленных роботов оценивается в 112 203 робота. При этом число промышленных роботов в 2010 году во всем мире приблизилось к 1,2 миллиону [5].

Число промышленных роботов, применяемых в развитых странах, приведено на рис. 1 [6].

Плотность роботов на число работников в обрабатывающей промышленности за рубежом составляет [6]:

- в Японии — 361 на 10 000 работников;
- в Германии — 236 на 10 000 работников;
- в Италии — 119 на 10 000 работников;

На рис. 2 приведен расчетный график ежегодного числа вновь устанавливаемых промышленных роботов, составленный по данным союза сварщиков Германии [6].

Использование промышленных роботов в различных технологических операциях позволяет: повысить гибкость и производительность производственных систем, освободить человека от тяжелых и монотонных операций, в том числе во вредных условиях труда, а также снизить объем брака выпускаемой продукции и улучшить ее качество и в итоге — повысить рентабельности производства [3, 6].

Виды технологических операций, в которых применяются

промышленные роботы, и их доля в общем объеме роботизированных производств западных стран приведены на рис. 3 [3].

По данным, приведенным в работе [3], в ближайшем будущем ожидается рост применения промышленных роботов в различных производствах согласно диаграмме, представленной на рис. 4, из которой следует, что самый высокий прирост ожидается в области сборки (67 %) и в области сварки (68 %).

Общая стоимость мирового рынка роботов оценивается в 6,2 млрд \$, а общая стоимость мирового рынка роботизированных систем — 19,0 млрд \$ [6].

В Российской Федерации общее число используемых промышленных роботов составляет примерно 3...5 тыс. штук, сконцентрированных в основном в автомобилестроении.

В последнее время появилась тенденция увеличения числа внедряемых роботов на предприятиях общей промышленности, связанная с отсутствием квалифицированных рабочих кадров (например, сварщиков) или со стремлением кардинально повысить качество выпускаемых изделий.

Несмотря на всю перспективность роботостроения, в России как спрос, так и предложение промышленных роботов очень малы. Общий годовой объем продаж в 2011 г. будет находиться в пределах 300...500 штук. Однако все крупнейшие мировые производители имеют здесь свои представительства и оценивают рынок как растущий. Вместе с тем уже многие годы на ОАО "АВТОВАЗ" осуществляется выпуск роботов.

Производство технологического оборудования и оснастки (ПТОО) — специализированное станкостроительное подразделение ОАО "АВТОВАЗ",

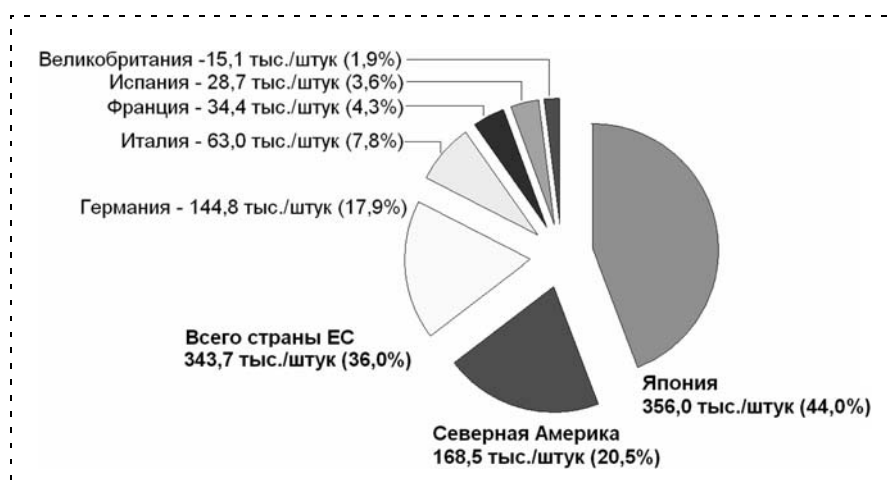


Рис. 1. Число роботов в развитых странах

обладающее более чем тридцатипятилетним опытом в решении задач по автоматизации производств. Сегодня ПТОО выпускает широкую линейку различного технологического оборудования, находящего применение на различных машиностроительных заводах страны: роботы и робототехнические комплексы, автоматические сварочные линии, металлообрабатывающие станки, обрабатывающие центры и автоматические линии механообработки. Также ПТОО выпускает сварочную, станочную оснастку, пресс-формы и штампы [4].

Строительство ПТОО было начато в 1972 г. и уже в 1979 г. были изготовлены первые автоматические манипуляторы МП-9С и МП-11, которые

до сегодняшнего дня успешно эксплуатируются на предприятиях России, доказывая свою надежность и высокие эксплуатационные качества. В 1984 г. ПТОО купила лицензию на производство промышленных электромеханических роботов ангулярного типа фирмы KUKA (Германия). С этого времени, регулярно обновляя модельный ряд, ПТОО изготавливает отечественные промышленные роботы, выпуская от 150 до 300 штук в год.

В решении проектных задач задействован мощный конструкторско-технологический ресурс. При проектировании роботов и роботизированного оборудования в ПТОО ОАО "АВТОВАЗ" используются программные продукты, применение которых

позволяет наиболее полно обеспечивать требования, предъявляемые заказчиком:

- система гибридного твердотельного и поверхностного моделирования Pro/ENGINEER;
- система инженерных расчетов PRO/ENGINEER MECHANICA;
- инструмент для электротехнического проектирования EPLAN;
- система моделирования работы робототехнических комплексов и автоматических линий в режиме реального времени ROBCAD.

Математическое моделирование с применением комплексных CAD/CAM/CAE систем позволяет повысить качество конструкторских работ, сократить сроки подготовки производства, в том числе провести проверку производственного процесса на ранней стадии проектирования, оптимизировать использование оборудования, точно рассчитать времена циклов и, в результате, выполнить пусконаладочные работы в короткие сроки [1].

В рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка и освоение производства гаммы отечественных универсальных технологических роботов для массовых автоматизированных производств гражданской машиностроительной продукции" по заказу Министерства промышленности и торговли Российской Федерации специалистами ПТОО совместно с МГТУ "СТАНКИН" разработано новое семейство отечественных роботов серии TUR грузоподъемностью от 15 до 350 кг (рис. 5, см. третью сторону обложки) [2].

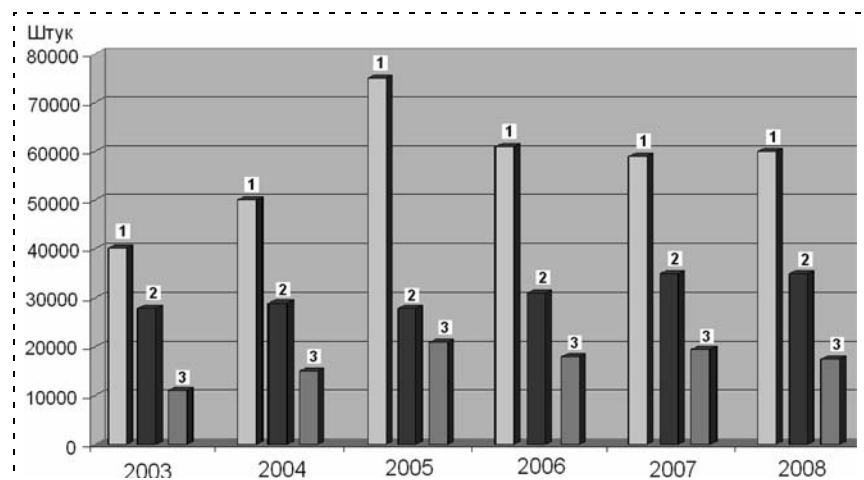


Рис. 2. Расчетное число ежегодно вновь устанавливаемых промышленных роботов: 1 — Азия/Австралия; 2 — Европа; 3 — Америка (Северная, Центральная, Южная)

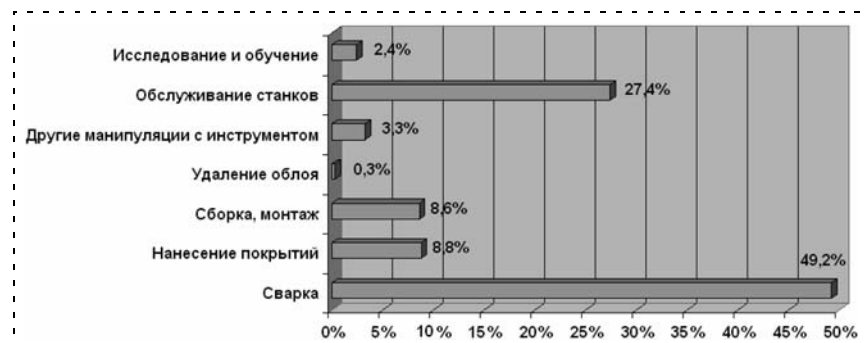


Рис. 3. Применение промышленных роботов по видам производства

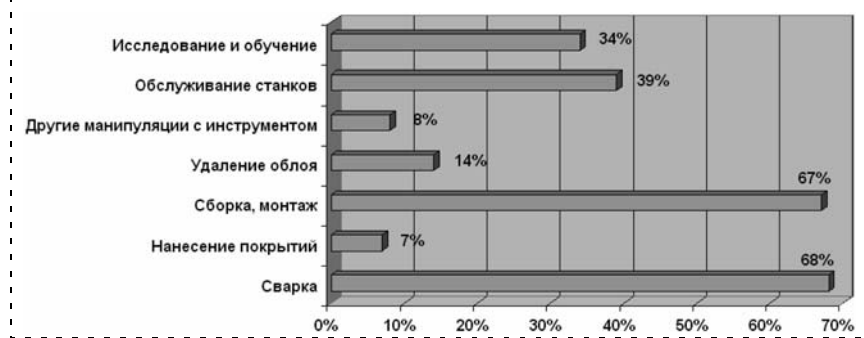


Рис. 4. Рост применения промышленных роботов по видам производства

Все роботы по своим техническим характеристикам отвечают самым жестким требованиям, предъявляемым современным рынком.

В мае 2010 г. в сборочно-кузовном производстве ОАО "АВТОВАЗ" была проведена модернизация автоматической линии сварки правой боковины LADA PRIORA, в ходе которой в состав автоматической линии был установлен серийный робот TUR 150 (рис. 6, см. третью сторону обложки), являющийся, по сути, первой в современной России отечественной разработкой.

Безупречная работа модернизированной автоматической линии в течение уже более чем 8 месяцев в условиях массового производства подтвердила эффективность принятых в конструкции роботов серии TUR проектных решений.

Специалисты ПТОО имеют богатый опыт в области проектирования, изготовления и запуска роботизированных автоматических сварочных линий современного уровня. В таблице приведено число роботизированных линий и роботов, изготовленных ПТОО для различных моделей автомобилей ОАО "АВТОВАЗ".

В общей сложности ПТОО изготовило и поставило в составе новых и модернизированных автоматических линий и робототехнических комплексов более 1500 роботов различных модификаций.

Из сказанного видно, что принципиальная возможность успешных продаж отечественных роботов на внутреннем рынке существует. Однако она зависит не только от сочетания параметра цена/качество, но и от желания инвесторов. К сожалению, сегодня иностранные компании, приходящие на рынок, отдают предпочтение роботам, произведен-

ным в своих странах, так как они им хорошо известны, имеется опыт их эксплуатации и обученный персонал. Российские инвесторы не торопятся вкладывать средства в обрабатывающие отрасли и продолжают концентрировать инвестиции в добывающей промышленности, только начиная задумываться о возможности вложения в другие направления.

Государство не отворачивается от проблемы. Именно благодаря государственной программе была создана гамма отечественных универсальных роботов серии TUR. Вместе с тем, о государственной политике в той или иной сфере промышленности можно судить по ставкам государственных таможенных пошлин. Сегодня таможенные пошлины на комплектующие, применяемые в составе робота, составляют 5...15 %, а на роботы и манипуляторы — 0 %.

Таким образом, сегодня можно смело говорить о наличии в стране современных моделей отечественных промышленных роботов и возможности наращивания их производства, однако крайне ограниченный спрос не позволяет им на равных конкурировать по цене с зарубежными аналогами.

Список литературы

1. Серебрянный В. В., Рыбальченко Д. Е., Севостьянов С. Н. Новая концепция робототехнических комплексов с применением системы автоматизированного моделирования в режиме реального времени // Мир сварки. 2010. № 12. С. 18—20.
2. Заявка на патент Российской Федерации на промышленный образец, МКПО⁸ 15-09. Манипулятор промышленный / В. В. Серебрянный, В. С. Минаев, Д. Е. Рыбальченко, М. А. Шмельков; заявитель и патентообладатель ОАО "АВТОВАЗ".
3. Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Системы промышленного зрения в промышленной робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 26—36.
4. Производство технологического оборудования и оснастки ОАО "АВТОВАЗ". URL: <http://robot.vaz.ru>
5. 10 Good Reasons to Invest in Robots. URL: <http://www.abb.ru/product/ru/9AAC910011.aspx>
6. Klaus Middeldorf. Тенденции в области технологий соединения материалов — улучшение экономических показателей (Tendenzen in der Fügetechnik Wertschöpfung in der Schweißtechnik) // Передовые технологии и развитие сварочной науки и техники. Матер. докл. междунар. научн.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2010.

Параметры	Модель автомобиля		
	CHEVROLET NIVA	LADA KALINA	LADA PRIORA
Число линий	4	23	21
Число роботов	46	363	292

ИНФОРМАЦИЯ

19—21 октября 2011 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

XI Международная конференция

"Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта" (CAD/CAM/PDM-2011)

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Организация структур технических и программных средств проектирования и управления.
- Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты.
- Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах.
- Средства виртуальной реальности в промышленных системах.
- Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами.
- PDM-системы, проектирование в машиностроении и строительстве и радиоэлектронике.

Подробную информацию см. на сайте конференции: <http://lab18.ipu.rssi.ru>

И. Ю. Гапонов, аспирант,

gaponov.igor@gmail.com,

Ю. В. Подураев, д-р техн. наук, проф.,

проректор, зав. каф.,

МГТУ "СТАНКИН",

Х.-Ч. Чхо, проф., зав. лаб.,

"Центр интеллектуальных систем",

Корейский университет технологии

и образования, Южная Корея

Генерация силы на основе изображения в дистанционно-управляемых микрообъектах

Предложен алгоритм оценки сил взаимодействия эффектора с микрообъектами на основе изображения в дистанционно-управляемых микрообъектах. Предложены и экспериментально проверены различные математические силовые модели окружающей среды. Применение предложенного метода позволило значительно улучшить качественные показатели микроманипулирования, что подтверждает его эффективность.

Ключевые слова: дистанционное управление, микроманипулирование, человеко-машинный интерфейс, силовая обратная связь

Введение

Манипулирование микрообъектами является актуальной задачей во многих медицинских, технологических и промышленных приложениях, таких как малоинвазивная и микрохирургия [1–3], сборка микроэлектроники [4, 5], внутриплазматическая и внутриядерная инъекция ДНК в живые клетки в сфере биотехнологий [6–8], стыковка молекул в химической промышленности и других. Данные задачи предъявляют исключительно высокие требования к точности позиционирования микрообъектов, что определяется как малыми размерами самих объектов манипулирования, так и их чувствительностью к внешним воздействиям. В настоящие дни подобные задачи успешно решаются с применением дистанционно-управляемых роботов [9]. Телеробототехнические системы для микроманипулирования обладают двумя характерными особенностями: в них система управления масштабирует движения руки человека-оператора, благодаря чему последний может действовать в макропространстве, вызывая при этом микроперемещения рабочего органа робота, а также увеличивает силу взаимодействия эффектора с объектом манипулирования, вследствие чего человек получает возможность ощущать силы амплитудой до нескольких наноньютонов. Несмотря на то, что активные работы в области микротелеробототехники начались в начале 90-х годов двадцатого века [10–11], разработка подобных систем

остаётся сложной задачей, главным образом, из-за трудностей в получении данных с силовых датчиков, высоких конструкторских требований к захватным устройствам и силовым датчикам, а также специфики систем управления подобными системами.

Рядом исследователей было экспериментально доказано, что введение силовой обратной связи существенно повышает эффективность микроманипулирования с помощью дистанционно управляемых (ДУ) микрообъектов (МРС) [12]. Таким образом, создание надежного человеко-машинного интерфейса с силовой обратной связью является одной из ключевых задач при разработке ДУ МРС в целом. В большинстве существующих ДУ МРС сила взаимодействия эффектора с окружающей средой измеряется с помощью специальных силовых датчиков, что негативно сказывается на универсальности робототехнической системы и увеличивает ее конструкторскую сложность. В данной статье для оценки силы предлагается использовать алгоритм, основанный на обработке изображения (ОИ).

1. Генерация силовой обратной связи на основе изображения

1.1. Сравнение силовых датчиков и методов генерации силы на основе изображения

В последние годы были разработаны различные силовые датчики, способные измерять силу амплитудой в доли микроныютонов. Можно выделить два основных типа подобных чувствительных устройств: поливинилиденфторид (ПВДФ)-датчики и МЭМС (микроэлектромеханические системы) [13–14]. Однако применение подобных датчиков связано со многими техническими трудностями, такими как конструктивная сложность взаимного размещения силовых датчиков и рабочего органа манипулятора, обусловленная их малыми размерами и хрупкостью,

Сравнительная характеристика недостатков применения силовых датчиков и генерации силы на основе обработки изображений

Силовые датчики	Алгоритмы обработки изображения
Технически сложно интегрировать в робототехническую систему из-за малых размеров и хрупкости Подвержены воздействию биологических и химических веществ Могут быть повреждены во время физического контакта с окружающей средой Часто требуют предварительной калибровки на основе известных механических свойств микрообъектов Выходной сигнал подвержен шумам и наводкам Нецелесообразны к использованию в операциях, требующих смены рабочего органа во время или после завершения манипулирования (например, микрохирургия)	Используют методы с большим объемом вычислений, приводящих к временным задержкам в СУ Не гарантируют успешного распознавания объектов Чувствительны к качеству изображения (яркости, шуму, разрешению картинки и др.) Требуют использования нескольких (стерео-) видеокамер для создания трехмерной силы

а также искажения получаемого с датчиков сигнала. Альтернативным способом оценки силы взаимодействия эффектора с окружающей микроскопической средой является воссоздание этой силы на основе известной или предполагаемой математической модели микрообъекта и визуальных данных о его деформации и перемещении/скорости. Так как в большинстве ДУ МРС микроскопы оснащены видеокамерами, передающими изображение на монитор перед пользователем, применение подобного метода генерации силы не создает необходимости установки какого-либо дополнительного оборудования. Тем не менее, генерация силы, основанная на анализе изображений, также имеет ряд недостатков, среди которых наиболее значительными являются увеличение вычислительной нагрузки, приводящее к временным задержкам внутри системы управления (СУ), и чувствительность методов обработки изображения к качеству картинки. Недостатки применения силовых датчиков и генерации силы на основе обработки изображений приведены в таблице.

Одним из важнейших преимуществ генерации силы на основе изображения является универсальность данного подхода, позволяющая применять его в различных областях микроробототехники и на различном оборудовании. К важным достоинствам подобного метода генерации силы также относится то, что он является бесконтактным. Однако прямое измерение силы с помощью датчиков позволяет исследовать действительный характер взаимодействия рабочего органа с микроскопическими объектами, что часто невозможно воссоздать в силовой модели.

1.2. Предлагаемый алгоритм визуальной генерации силы

Для успешной генерации силы на основе изображения управляющий алгоритм должен успешно распознавать и различать два вида объектов: рабочий орган манипулятора и сам объект манипулирования. Обе задачи крайне важны для работы системы управления ДУ МРС, так как необходимо отслеживать положение конечной точки эффектора для определения начала контакта с окружающей средой для последующей генерации силы. Несмотря на то, что координаты рабочего органа могут быть найдены методом решения прямой задачи кинематики для ведомого манипулятора, для уменьшения риска повреждения эффектора необходимо периодически оценивать текущую позицию рабочего органа с помощью обработки изображения на экране.

В настоящее время применяются два основных метода определения положения конечной точки рабочего органа на основе изображения. Так как форма рабочего органа

обычно заранее известна, представляется возможным сравнивать каждый кадр изображения, получаемого с рабочей зоны манипулятора, с заданным эталонным изображением (шаблоном) рабочего органа для нахождения совпадающей области, которая и будет считаться текущим местоположением эффектора. Данный метод называется *методом сравнения с шаблоном* (СШ) и обладает рядом недостатков, таких как сравнительно большое время вычислений и зависимость от заданного эталонного изображения, что делает невозможным распознавание рабочего органа в случае его деформации или смены на эффектор другого типа во время манипулирования.

Другой метод, называемый *методом нахождения разности кадров* (РК), заключается во взаимном вычитании текущего и предыдущего кадров изображения для определения отличных областей. Математически данный метод может быть описан следующим образом:

$$R_k = |K(t) - K(t - \Delta t)|,$$

где R_k — полученная разность кадров; t — текущее значение времени; Δt — разница во времени между соседними кадрами (определяется кадровой частотой).

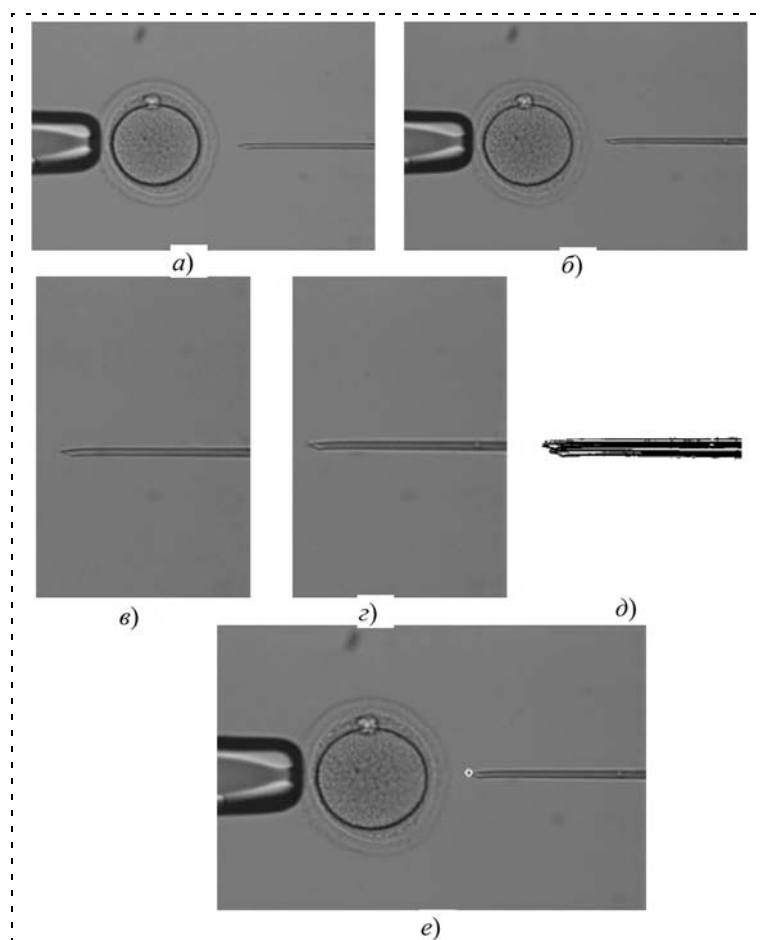


Рис. 1. Этапы распознавания рабочего органа:

a — кадр 1; b — кадр 2; c — зона интереса для кадра 1; d — результат РК; e — найденная крайняя точка рабочего органа (при движении влево)

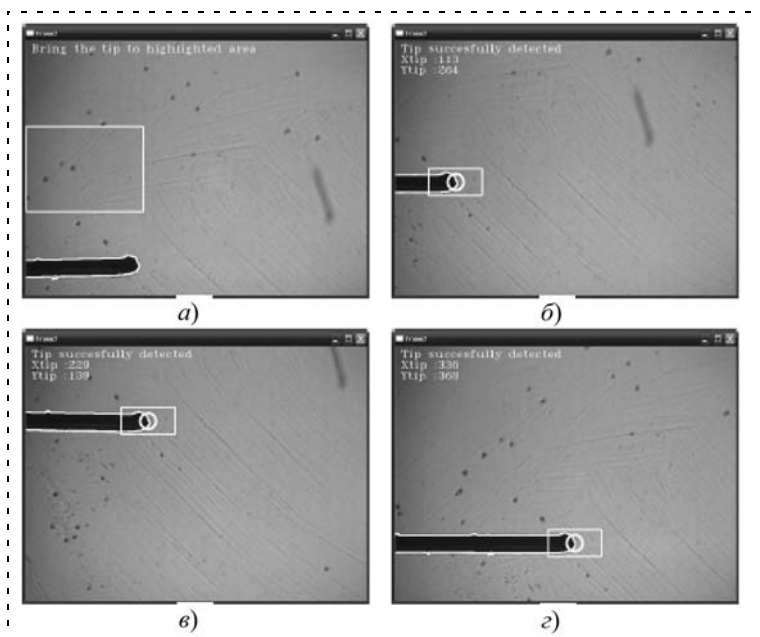


Рис. 2. Распознавание конечной точки рабочего органа:

а — перед началом манипулирования оператору предлагается поместить рабочий орган в отмеченную прямоугольную область; *б* — найденная крайняя точка рабочего органа (в центре окружности), ее текущие координаты (вверху экрана) и зона интереса (белый прямоугольник); *в–г* — определение координат конечной точки рабочего органа и ее координат в ходе манипулирования

той), $K(t)$ и $K(t - \Delta t)$ являются массивами данных с информацией о текущем и предыдущем кадрах изображения (чаще всего в бинарном формате). Таким образом, можно легко определять конечную точку эффектора, зная направление его движения. Описанный метод был выбран для предлагаемого алгоритма генерации силы. Метод РК был реализован на языке программирования C++ с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения (OpenCV). Необходимые шаги предварительной обработки изображения и найденное в результате положение конечной точки рабочего органа представлены на рис. 1. Кадры изображения взяты из видеозаписи роботизированной инъекции генетического материала в живую клетку.

Экспериментальные результаты использования данного метода для нахождения конечной точки рабочего органа в ходе микроманипулирования с применением разработанной ДУ МРС представлены на рис. 2. Ширина экрана соответствует 3 мм.

Как уже говорилось, второй основной задачей алгоритма распознавания изображения является определение контура микрообъекта. Два основных методами распознавания контуров объектов можно считать метод активных контуров (АК) с его производными и преобразование Хофа [7, 8, 15]. Для обоих методов желательно иметь черно-белое изображение с четкими границами и без посторонних объектов, иначе вероятность успешного определения контуров значительно снижается. Таким образом, для обоих методов необходимы некоторые операции предварительной обработки изобра-

жения. В предлагаемом алгоритме генерации силы контуры предметов определяются с помощью метода АК, так как он требует меньших вычислительных затрат по сравнению с преобразованием Хофа.

Таким образом, основные этапы работы предлагаемого алгоритма распознавания изображения состоят в следующем. На шаге инициализации происходит загрузка шаблона с изображением рабочей зоны манипулятора без рабочего органа. Этот кадр будет использоваться в дальнейшем для определения конечной точки эффектора методом РК. На следующем шаге происходит задание области интереса (ОИ), которая помещается в левой части экрана. Задание ОИ крайне важно для уменьшения вычислительных затрат. После помещения пользователем рабочего органа в заданную область происходит нахождение крайней правой точки эффектора и уменьшение размеров ОИ (до 100×50 пикселей). Ширина ОИ была выбрана несколько большей ее высоты по той причине, что скорость движения рабочего органа вдоль горизонтальной оси в большинстве случаев была больше скорости его вертикального движения. Центр

ОИ постоянно находится в крайней правой точке рабочего органа, таким образом, ОИ перемещается вместе с рабочим органом в ходе манипулирования. Параллельно с нахождением конечной точки рабочего органа происходит распознавание контура объекта манипулирования. Так как обычно в кадре находится один подобный объект, то после необходимых шагов предварительной обработки изображения (фильтрации в целях удаления мелких частиц и артефактов) и непосредственно выделения границ всех объектов на изображении происходит поиск объекта с максимальной длиной контура. Данный поиск необходим, потому что даже после фильтрации изображения алгоритм поиска контуров может распознать до нескольких десятков объектов с замкнутым контуром, размер которых будет значительно меньше размеров объекта манипулирования. Например, размер крупных частиц пыли обычно не превышает нескольких микрометров, в то время как микрообъекты манипулирования чаще всего имеют линейные размеры в несколько десятков микрометров и более.

2. Выбор силовой модели

Завершающим этапом алгоритма генерации силы после определения деформации и параметров движения микрообъекта является расчет значения силы на основе выбранной математической модели. Для некоторых объектов микромира, например живых клеток, механические свойства и зависимость деформации оболочки от прилагаемой силы хорошо

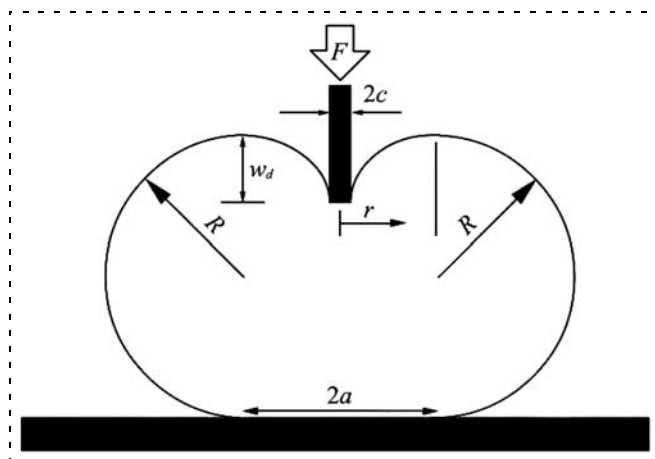


Рис. 3. Деформация клетки во время прокалывания

изучены, что позволяет определять силу реакции объекта на основе его деформации с достаточно высокой точностью. Так, Сан с соавторами исследовал поведение яйцеклеток мышей во время внутриклеточных инъекций (рис. 3) и вывел следующую модель силы [16]:

$$F = \frac{2\pi E h w_d^3}{\alpha^2 (1 - \nu)} \left[\frac{3 - 4\zeta^2 + \zeta^4 + 2\ln\zeta^2}{(1 - \zeta^2)(1 - \zeta^2 + \ln\zeta^2)^3} \right],$$

где E — модуль упругости оболочки клетки, ν — коэффициент Пуассона, h — толщина биомембраны, $\zeta = c/a$, c — радиус иглы, a — радиус вмятины, w_d — глубина проникновения иглы после контакта.

В этом уравнении свойства материала E и ν и размеры h и c являются константами, в то время как переменные a и w_d вычисляются методами обработки изображения. Таким образом, после определения этих двух переменных представляется возможным сгенерировать силу реакции клетки и передать ее оператору через задающее устройство. Однако чаще всего модель поведения микрообъектов манипулирования в ходе контакта с рабочим органом отсутствует или существенно различается для каждого конкретного объекта. Например, в описанном выше случае с живыми клетками механические свойства их оболочки будут сильно отличаться друг от друга в зависимости от текущей стадии развития клетки, не говоря уже про различия характеристик клеток разных видов животных. В данной работе предлагается оценивать силы реакции со стороны микрообъектов на основе классической математической модели макрообъекта, обладающего в общем случае инерционно-упруго-вязкими свойствами:

$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx,$$

где F — вычисленное значение силы; $\ddot{x}$, $\dot{x}$ и x — ускорение, скорость и перемещение объекта манипулирования; m , b и k — масса, вязкость и упругость.

Несмотря на то, что данная силовая модель не будет отражать настоящей картины сил, имеющей место в микромире, данный подход позволяет человеку-оператору взаимодействовать с микрообъектом так, как если бы это был объект макромира. После контакта рабочего органа с микрообъектом силовая модель может быть автоматически определена следующим образом:

- если дальнейшее перемещение эффектора вызывает перемещение всего контура объекта без его деформации, выбирается инерциальная ($F = m\ddot{x}$) или инерционно-вязкая силовая модель ($F = m\ddot{x} + b\dot{x}$);
- если дальнейшее перемещение эффектора вызывает частичное смещение контура объекта только со стороны рабочего органа, это означает, что происходит деформация объекта эффектором, и выбирается вязко-упругая силовая модель ($F = b\dot{x} + kx$);
- если дальнейшее перемещение рабочего органа не вызывает изменения контура объекта, это означает, что произошел прокол объекта, и выбирается вязкая модель силы ($F = b\dot{x}$).

Приведенные выше силовые модели соответствуют следующим видам микроманипулирования:

- перемещение объектов (силовая модель: инерциальная $F = m\ddot{x}$ или инерционно-вязкая $F = m\ddot{x} + b\dot{x}$);
- зондирование или начальная стадия прокалывания упругих объектов (силовая модель: упругая $F = kx$ или упруго-вязкая $F = b\dot{x} + kx$);
- прокалывание/инъекции (вязкая модель $F = b\dot{x}$).

Стоит заметить, что подобный автоматический выбор силовой модели возможен только в случаях, когда контур объекта манипулирования целиком находится в кадре видеокамеры. В остальных случаях тип силовой модели должен быть выбран оператором вручную в зависимости от специфики выполняемых операций.

3. Экспериментальная часть

В описанных ниже экспериментах приняли участие пять различных операторов. В ходе каждого отдельного эксперимента управляющая программа записывала данные о точности и времени манипулирования. После завершения задания сравнивали показатели оператора при управлении ДУ МРС с силовой обратной связью и без нее. Для оценки производительности предложенного алгоритма генерации силы на основе изображения были проведены два вида экспериментов: микроманипулирование с упругой и инерционно-вязкой силовыми моделями объекта манипулирования. Условия проведения, задачи каждого из экспериментов и полученные экспериментальные результаты представлены ниже.

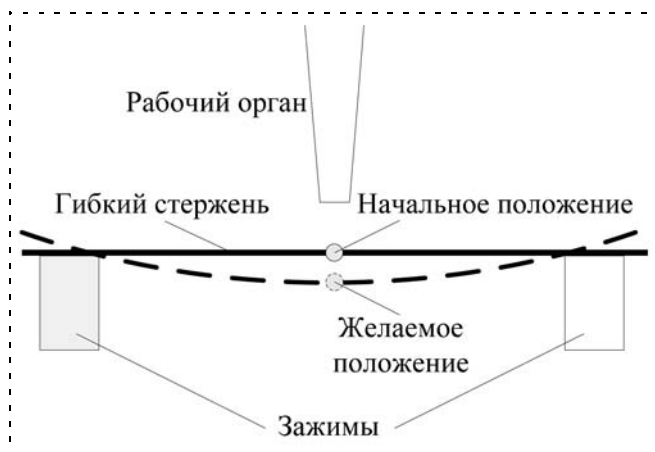


Рис. 4. Схема эксперимента для проверки генерации силы согласно упругой силовой модели



Рис. 5. Контакт микрообъекта с рабочим органом в ходе экспериментов с применением упругой силовой модели

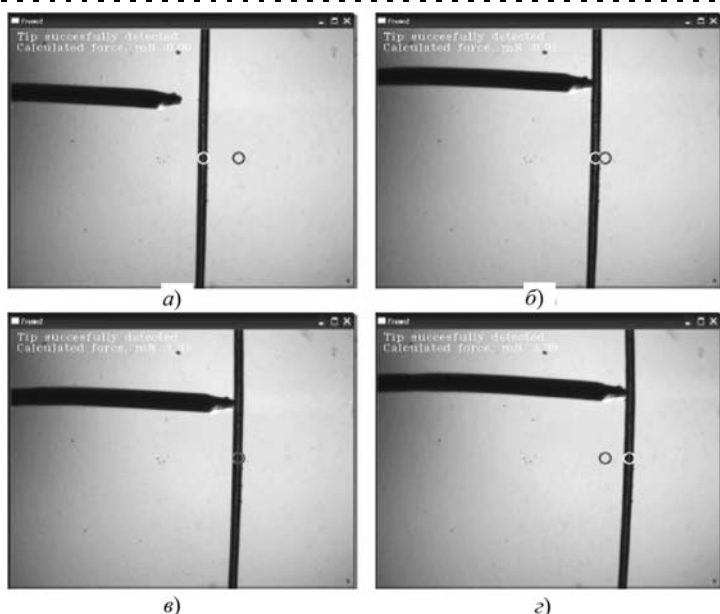


Рис. 6. Желаемое (темная окружность) и текущее (светлая окружность) положения микрообъекта в ходе манипулирования с генерацией силы согласно жесткой модели:

а — перед началом манипулирования; б — пример недорегулирования; в — точное позиционирование; г — пример перерегулирования

3.1. Описание экспериментальной установки

Эксперименты были проведены на специально разработанной ДУ MPC. В качестве задающего устройства был использован настольный манипулятор Phantom Omni от Sensable Technologies. В качестве ведомого устройства применяли специально разработанный манипулятор с параллельной архитектурой, конструкция и кинематика которого описана в [17]. Устройство имело максимальную точность позиционирования, равную 0,25 мкм. Ведомый манипулятор управлялся через интерфейс NI PCI-7358 с помощью программы, написанной на языке C++. Цифровое черно-белое изображение области манипулирования разрешением 640 × 480 точек поступало на монитор через видеокамеру Teli CS8620i (Toshiba), установленную на микроскоп Motiс AE-31. Кадровая частота камеры составляла 30 кадров в секунду.

3.2. Оценка упругой силовой модели

В ходе экспериментов по оценке упругой модели силы разработанный алгоритм генерировал однокоординатную силу реакции согласно следующей модели:

$$F = kx. \quad (1)$$

В качестве объекта манипулирования был выбран гибкий микростержень радиусом 55 мкм. Стержень был закреплен зажимами с обоих концов, что исключало его поступательное движение в процессе контакта с рабочим органом, но позволяло прогибаться под действием силы. Схематический вид зоны манипулирования и ее фотография представлены на рис. 4, 5.

В ходе эксперимента перед оператором стояла задача повторно перемещать отмеченную на объекте манипулирования точку в заданное положение и затем возвращать ее в исходное положение, толкая микрообъект рабочим органом ведомого манипулятора. Число таких повторений было выбрано равным 10, при этом каждый пользователь проводил три серии подобных повторений, после чего находили среднее арифметическое значение экспериментальных показателей. Оператор мог чувствовать упругость стержня при его прогибе после контакта с рабочим органом, при этом коэффициент упругости в выражении (1) варьировали от 0 до 50 Н/м для поиска оптимального значения жесткости. Значение сгенерированной силы в дальнейшем умножали на 500 и передавали оператору через задающее устройство. Несколько типичных случаев манипулирования во время описанного эксперимента представлены на рис. 6.

Так как каждый оператор проводил манипулирование с комфортной для себя скоростью, оказалось невозможным сравнивать экспериментальные данные, полученные от

разных операторов только на основе времени манипулирования или его точности. Более медленное позиционирование микрообъекта в большинстве случаев приводило к меньшей ошибке, поэтому для сравнения экспериментальных результатов, показанных различными операторами, был введен некий унифицированный критерий, равный произведению времени манипулирования на среднюю ошибку позиционирования. Результат манипулирования считался тем лучше, чем меньше было значение предложенного унифицированного критерия.

В результате обработки полученных экспериментальных данных было найдено оптимальное значение жесткости микрообъекта, примерно равное $k = 10$ Н/м. При данном выбранном значении жесткости объекта манипулирования операторы обычно демонстрировали более высокую точность и скорость микропозиционирования. При манипулировании с меньшим коэффициентом жесткости операторы испытывали недостаток информации о контакте рабочего органа с микрообъектом, что часто приводило к позиционному перерегулированию, вызванному инерцией человеческой руки. Увеличение жесткости значительно снижало число случаев перерегулирования, однако приводило к быстрой усталости операторов и, как следствие, большему времени, требуемому для завершения экспериментов.

На основе экспериментальных данных была построена кривая (рис. 7).

3.3. Оценка инерционно-вязкой силовой модели

Целью экспериментов с генерацией силы согласно инерционно-вязкой модели было перемещение микрообъекта из начальной позиции в желаемую. Точность позиционирования вычисляли как процентное отношение площади пересечения желаемого и результирующего контуров объекта к его площади. Результаты работы данного метода оценки точности представлены на рис. 8. Экспериментальные графики вычисляемой двухкоординатной силы показаны на рис. 9 для следующих параметров: $m = 0,1$ кг и $b = 1$ Н·с/м. Скорость и ускорение объекта определяли предложенным алгоритмом обработки изображения. Как видно из рис. 9, микрообъект двигался в противоположных направлениях на отрезках времени с 61-й по 65-ю и с 68-й по 70-ю секунды, а начиная с 72-й секунды объект перемещался в основном вдоль вертикальной оси.

Согласно экспериментальным данным точность позиционирования с силовой обратной связью для описанных выше па-

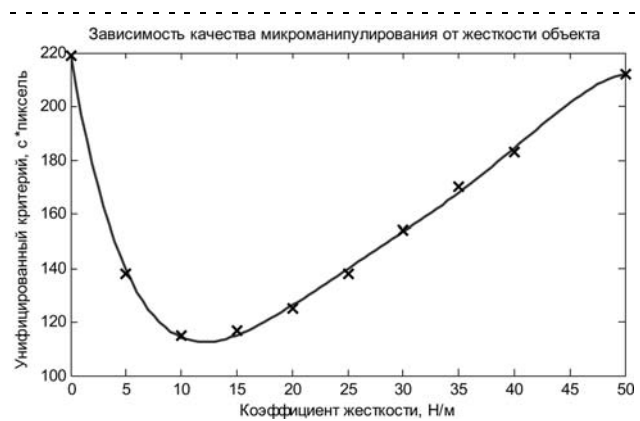


Рис. 7. Оптимальное экспериментальное значение жесткости микрообъекта

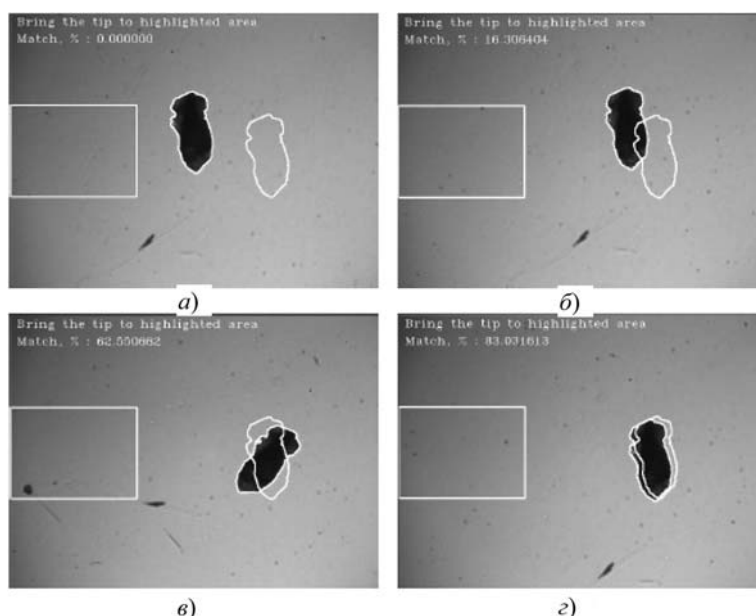


Рис. 8. Результаты работы метода оценки точности манипулирования: а — начальное и желаемое положения объектов; б — неточное позиционирование (совпадение: 18,3 %); в — умеренно точное позиционирование (совпадение: 62,6 %); г — сравнительно точное позиционирование (совпадение: 83 %)



Рис. 9. Сгенерированная сила вдоль горизонтальной и вертикальной осей

раметров инерциально-вязкой модели силы увеличилась на 21,8 % по сравнению с аналогичными результатами, показанными операторами при манипулировании без силовой обратной связи. Поиск оптимальных коэффициентов для данной силовой модели является многомерной задачей, и данные исследования ведутся в настоящий момент.

Заключение

В данной статье предложен алгоритм генерации силовой обратной связи на основе изображения, обладающий рядом преимуществ по сравнению с классическим контактным измерением сил реакции со стороны окружающей среды. Проведенные эксперименты подтвердили валидность предложенного метода. Экспериментальные исследования позволили найти оптимальные параметры окружающей среды для экспериментов с жесткими микрообъектами. Предложенный алгоритм может эффективно применяться в дистанционно управляемых микро-робототехнических системах для решения различных задач микроманипулирования.

Список литературы

1. **Salcudean S. E., Yan J.** Towards a Force-reflecting Motion-Scaling System for Microsurgery // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1994. V. 3. P. 2296—2301.
2. **Mitsuishi M., Kobayashi K., Watanabe T., Nakanishi H., Watanabe H., Kramer B.** Development of an Inter-World Tele-Micro-Surgery System with Operational Environment Information Transmission Capability // Int. Conf. Robotics and Automation. 1995. V. 3. P. 3081—3088.
3. **Tanimoto M., Arai F., Fukuda T., Negoro M.** Force Display Method to Improve Safety in Teleoperation System for Intravascular

- Neurosurgery // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1999. V. 3. P. 1728—1733.
4. **Codourey A., Rodriguez M., Pappas I.** A Task-oriented Teleoperation System for Assembly in the Microworld // 8th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR '97). 1997. P. 235—240.
5. **Ando N., Korondi P., Hashimoto H.** Networked Telemicro-manipulation Systems "Haptic Loupe" // IEEE Trans. on Industrial Electronics. V. 51. Iss. 6. P. 1259—1271.
6. **Sun Y., Nelson B. J.** Microrobotic cell injection // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2001. P. 620—625.
7. **Wang W. H., Liu X. Y., Sun Y.** Autonomous Zebrafish Embryo Injection Using a Microrobotic System // IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering. 2007. P. 363—368.
8. **Huang H., Dong S., Mills J. K., Cheng S. H.** Automatic suspended cell injection under vision and force control biomaniipulation // IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics. 2007. P. 71—76.
9. **Кулешов В. С., Лакота Н. А.** Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. М.: Машиностроение, 1986.
10. **Hunter I. W., Lafontaine S., Nielsen P. M. F., Hunter P. J., Hollerbach J. M.** Manipulation and Dynamic Mechanical Testing of Microscopic Objects Using a Tele-Micro-Robot System // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1989. V. 3. P. 1553—1558.
11. **Kobayashi H., Nakamura H., Tatsuno J., Iijima S.** Micro-Macro Tele-Manipulation System // IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. 1993. P. 165—170.
12. **Pillariseti A., Pekarev M., Brooks A. D., Desai J. P.** Evaluating the effect of force feedback in cell injection // IEEE Trans. Automation Science and Engineering. 2007. V. 4 (3). P. 322—331.
13. **Li W. J., Ning Xi.** Novel micro gripping, probing, and sensing devices for single-cell surgery // 26th IEEE Annual Int. Conf. of Engineering in Medicine and Biology Society (IEMBS '04). 2004. V. 1. P. 2591—2594.
14. **Olivier-Don Truong, Kaou N., Martel S.** Integration of MEMS with a SoC in a microrobot // IEEE-NEWCAS Conf. 2005. P. 75—78.
15. **Pillariseti A., Anjum W., Desai J. P., Friedman G., Brooks A. D.** Force Feedback Interface for Cell Injection // Proc. IEEE First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2005.
16. **Sun Y., Wan K.-T., Roberts K. P., Bischof J. C., Nelson B. J.** Mechanical Property Characterization of Mouse Zona Pellucida // IEEE Trans. Nanobioscience. 2003. V. 2. Iss. 4. P. 279—286.
17. **Gaponov I., Ryu J.-H., Choi S.-J., Cho H.-C.** Telerobotic system for cell manipulation // IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2008). 2008. V. 1. P. 165—169.

ИНФОРМАЦИЯ

16—19 апреля 2012 г. в Москве в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

3-я Российская конференция с международным участием

"Технические и программные средства управления, контроля и измерения" (УКИ-12)

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- ◆ Теория, методы исследования и проектирования, опыт применения технических средств, основанных на различных физических и схематических принципах
- ◆ Теория, алгоритмы и программное обеспечение систем УКИ
- ◆ Анализ состояния, тенденций и перспектив развития систем УКИ
- ◆ Дискретно-событийные модели в системах УКИ, включая сетевые, логические, на основе нечеткой логики, сети Петри и др.
- ◆ Создание средств систем УКИ на основе новых современных технологий
- ◆ Компьютерное и физическое моделирование технических и программных средств систем УКИ
- ◆ Многопроцессорные и многомашинные системы как средства систем УКИ; их архитектуры, надежность, отказоустойчивость, диагностируемость
- ◆ Теоретические и прикладные аспекты оценивания и повышения качества средств систем УКИ, метрологическое обеспечение создания и применения средств УКИ, их испытания и сертификация
- ◆ Методы проектирования технических и программных средств систем УКИ для работы в экстремальных условиях и применения в специфических областях
- ◆ Особенности построения технических и программных средств встроенных, сетевых систем УКИ
- ◆ Вопросы обучения в области средств систем УКИ

Подробную информацию о конференции см. на сайте: <http://cmm.ipu.ru>



**Международная
молодежная конференция
«МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА»**

6-8 сентября 2011 года

**Государственный научный центр РФ
ЦНИИ РТК
Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21**

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ЦЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

Привлечение внимания научной и деловой общественности и бизнес сообщества к научным достижениям молодых ученых в области мехатроники и робототехники

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

Государственный научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

- Минобрнауки России
- РАН
- Правительства Санкт-Петербурга

ФИНАНСОВЫЕ УСЛОВИЯ

Участие в конференции бесплатное

ОФОРМЛЕНИЕ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ

Для участия в конференции необходимо направить регистрационную форму, материалы докладов и экспертное заключение о возможности публикации на **e-mail: mrspsb@rtc.ru** в срок **до 30 июля 2011 года** или зарегистрироваться в интерактивном режиме на сайте: **<http://www.rtc.ru/>**

После рассмотрения программным комитетом представленных материалов будет выслано уведомление о принятии докладов и приглашение на участие в конференции

ЭТАПЫ ПРОХОЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрение и отбор представленных материалов Программным комитетом **до 5 августа 2011г.**

Уведомление участников о принятии докладов и рассылка приглашений **до 10 августа 2011г.**

СЕКРЕТАРИАТ КОНФЕРЕНЦИИ

тел.: (812) 5524162; e-mail: mrspsb@rtc.ru

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- **Тенденции и перспективы развития мехатроники и робототехники**
Миниатюризация. Интеллектуализация. Интеграция. Бионический подход. Проблемы "человеческого" фактора
- **Интеллектуальные системы управления движением**
Методы искусственного интеллекта. Когнитивные и креативные системы. Человеко-машинные системы
- **Мини- и микроробототехника**
Особенности построения. Микроманипулирование. Наноразмерные компоненты
- **Системы осязательства и обработка сенсорной информации**
Сенсорные системы общего и специального назначения. Комплексирование сенсорных систем. Распознавание образов. Формирование моделей внешней среды на основе сенсорной информации
- **Реконфигурируемые системы**
Модульные системы переменной структуры. Самоорганизация и самосовершенствование
- **Вопросы метрологии в мехатронике и робототехнике**
Измерения и испытания. Тестирование. Метрологическое обеспечение проектов

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ

Русский, английский

ТРЕБОВАНИЯ К ДОКЛАДАМ

Материалы (не более 8 страниц) пересылаются на **e-mail: mrspsb@rtc.ru** в виде файла в формате **Word for Windows**.

Формат страниц – А4; поля: верхнее и нижнее – 1,8 см, левое и правое – 1,9 см. Шрифт текста – Times New Roman Сур 11 пунктов, позиция табуляции абзаца – 0,8, единственный междустрочный интервал.

Таблицы, рисунки (как объекты) вставляются в текст и обязательно должны содержать название. Графики должны быть выполнены в черно-белом варианте.

Фамилии и инициалы авторов – в правом верхнем углу, шрифт – полужирный курсив, интервал после – 9 пунктов; название – по центру, шрифт – прописной полужирный; интервал после – 9 пунктов; название организации, город, e-mail авторов: шрифт – курсив, интервал после – 9 пунктов; основной текст.

Библиографические ссылки даются арабскими цифрами в квадратных скобках. Список литературы - через 6 пунктов после текста без заголовка и абзаца.

Подробная информация о конференции на сайте: <http://www.rtc.ru/>

УДК 681.514

В. Ф. Головин, канд. техн. наук, доц.,
М. В. Архипов, ассистент,
В. В. Журавлев, ассистент,
medicalrobot@mail.ru,
Московский государственный
индустриальный университет

Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине

Приводится классификация робототехнических систем в медицине, рассматривается современное состояние робототехники в восстановительной медицине и возможные перспективы развития. Описываются различные робототехнические средства для выполнения движений конечностей в суставах, процедур манипуляций на мягких тканях (разнообразного массажа) и аппараты для протезирования. Также делаются выводы о современном состоянии и перспективах развития робототехники в восстановительной медицине.

Ключевые слова: робототехника, восстановительная медицина, движение конечностей в суставах, массаж, протезирование

1. Классификация медицинских роботов

Для систематизации известных и возможных робототехнических систем (РТС) в медицине пред-



Рис. 1. Классификация медицинской робототехники

ложен ряд классификаций [1, 2]. В качестве признаков классификации использованы следующие: инвазивность процедуры, безопасность, мобильность, эргономичность, контроль как управление или диагностика. Один из вариантов классификации, учитывающий последние достижения в медицинской робототехнике, приведен на рис. 1. Основные три класса — это роботы для восстановительной медицины, роботы для жизнеобеспечения и роботы для хирургии, терапии и диагностики. Они представляют собой основные области медицинской робототехники, хотя эти классы и их подклассы не являются независимыми по указанным выше признакам. Ниже в разделах 3—5 рассматриваются представители обозначенных в классификации подклассов восстановительной медицины.

2. Концепция разработки и внедрения роботов в восстановительной медицине для здоровых людей

Восстановительная медицина — это медицинская деятельность, направленная на диагностику функциональных резервов, сохранение и восстановление здоровья человека посредством оздоровления и медицинской реабилитации. Под оздоровлением следует понимать комплекс профилактических мероприятий, направленных на восстановление сниженных функциональных резервов и адаптивных возможностей организма у практически здоровых лиц [3, 4, 5, 6]. Особенную роль профилактической медицины отмечал Нобелевский лауреат И. П. Павлов (рис. 2). По его словам: "Профилактическая медицина достигает своих социальных

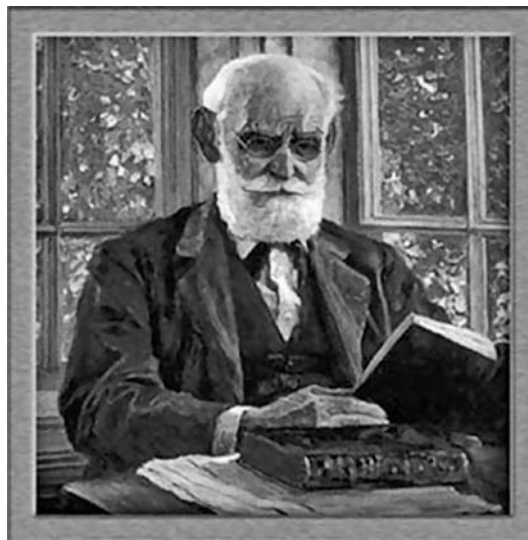


Рис. 2. И. П. Павлов, Нобелевский лауреат 1904 г.

целей только в случае перехода от медицины патологии к медицине здоровья здоровых".

Восстановительная медицина отличается по существу от медицинской реабилитации, которая представляет собой комплекс диагностических и лечебно-профилактических мероприятий, направленных на восстановление или компенсацию нарушенных функций организма человека и трудоспособности у больных лиц и инвалидов.

Реабилитация — это закрепление лечебного эффекта в процессе выздоровления больного после болезни. В отличие от реабилитации, обеспечивающей восстановление здоровья у больного человека, восстановительная медицина направлена на воспроизводство утраченных резервов здоровья. Лечебно-оздоровительный арсенал восстановительной медицины обеспечивает человеку социально-творческую активность в своей профессии, т. е. работоспособность в тех условиях, в которых протекает его профессиональная деятельность. Реабилитация по преимуществу сосредоточена на органной патологии, и ее критериальный аппарат оценивает степень возвращения к норме. Методический инструментарий восстановительной медицины перенацеливается с поиска симптомов болезни на оценку резервных функциональных возможностей организма с учетом именно тех нагрузок и условий труда, в которых работает человек.

В основу концепции развития здравоохранения и медицинской науки в Российской Федерации на период до 2010 г. положена здоровьесцентрическая модель системы здравоохранения, разработанная РНЦВМиК под руководством академика А. Н. Разумова (рис. 3). Суть модели состоит в акценте на сохранении здоровья здорового человека а, следовательно, на восстановительной медицине [7].

К восстановительной медицине прибегают не только травмированные в военных действиях, на производстве, в спорте люди, больные детским церебральным параличом, постинсультные больные, но и люди здоровые, устающие от физической и умственной деятельности, у которых снижена работоспособность, например, преподаватели и студенты университетов. Уместно сказать здесь о развивающейся в настоящее время системе интенсивного информатизированного обучения, которая для повышения эффективности обучения предполагает концентрацию усилий как обучающихся, так и преподавателей без ущерба их здоровья. Для них необходимой является рассматриваемая восстановительная медицина.

Восстановительная медицина включает ряд видов терапии, в том числе немедикоментозную, одним из которых является механотерапия. Среди множества известных средств механотерапии наибольшими возможностями обладает робототехника.

О необходимости применения аппаратных средств оздоровительного массажа именно для здоровых людей писал в своей диссертации "Материалы к вопросу о действии массажа на здоровых людей"

в 1882 г. русский ученый Н. В. Заблудовский [8] (рис. 4): "Нельзя ли воспользоваться усовершенствованиями механики для устройства таких машин, которые заменили бы действия рук, или не будет ли даже действие машин предпочтительнее действия рук? Стоило бы изобрести машину, силу которой можно было бы в каждый момент определять в цифрах и вместо работы массёра, зависящей от субъективного мышечного чувства, иметь дело с работой, выраженной в цифрах. Другими словами — вместо того, чтобы количество целебного средства взять на глазок, взвешивать его на точных весах".

В те времена это было невозможно, и ученый лишь мечтал о возможности дозирования воздействий на аппаратных средствах будущего. В настоя-



Рис. 3. А. Н. Разумов, академик РАМН



Рис. 4. Н. В. Заблудовский, 1882 г.

шее время мечты великого предсказателя могут быть реализованы при обращении к развитой адаптивной интеллектуальной робототехнике. Проблема для медицины, в первую очередь, состоит в развитии концепции Н. В. Заблудовского о новом подходе к физической культуре человека с участием не только волевых и пассивных движений, но и массажа. Массаж может иметь как функцию релаксации, так и мобилизации. В оптимальном объединении этих функций физическая культура сможет в большей степени способствовать сохранению и повышению запасов здоровья и повышению работоспособности в физическом и умственном труде.

Поэтому существом концепции разработки и внедрения роботов в восстановительную медицину для здоровых людей является использование адаптивных и интеллектуальных роботов в сочетании с другими видами терапий: аромо-, мело-, психотерапией для сохранения повышения запасов здоровья людей, повышения их работоспособности.

В соответствии с классификацией, предложенной выше, проведен обзор состояния робототехники для восстановительной медицины по трем направлениям: манипуляции на суставах или движения конечностей в суставах; манипуляции на мягких тканях, т. е. разнообразный массаж; активные и биоуправляемые протезы.

3. Роботы для выполнения движений конечностей в суставах

Движения конечностей в суставах широко используются в спортивной, восстановительной медицине, в лечении и обучении пациентов с последствиями инсульта, детского церебрального паралича. Пассивные и активные движения конечностей в суставах часто выполняются вместе с массажем, в том числе, и в оздоровительных целях. Механотерапия заменяет руки врача руками манипулятора. Одни из первых работ, в которых был предложен манипуляционный шестиприводной робот для массажа и движения конечностей в суставах, появились в 1997 г. [9]. Позднее появляются одноприводные роботы американской фирмы "Biodex" [10], швейцарской фирмы "Con-Trex" и четырехприводной робот швейцарской фирмы "Lokomat" [11].

Робот швейцарской фирмы "Lokomat" является наиболее ярким представителем подкласса реабилитационных роботов для выполнения движений конечностей в бедренных, коленных и голеностопных суставах. Существует концепция нейропластичности, которая предполагает "постановку задачи специфического обучения" и заключается в том, что с помощью многократно повторяющихся тренировок можно улучшить повседневную двигательную активность у пациентов с неврологическими нарушениями. Роботизированная терапия на комплексе Lokomat отвечает вышеописанным требованиям и дает возможность проведения интенсивной локо-



Рис. 5. Робототехнический комплекс Lokomat

моторной терапии с обратной связью. Общий вид комплекса представлен на рис. 5.

Lokomat состоит из четырех приводов для навязывания движений ходьбы и системы разгрузки веса пациента и беговой дорожки.

Пациенты, находящиеся в инвалидном кресле, могут быть без особого труда переведены на полотно беговой дорожки и закреплены с помощью специальных фиксаторов. Управляемые компьютером приводы синхронизированы со скоростью беговой дорожки. Они задают ногам пациента траекторию движения, которая формирует ходьбу, близкую к естественной.

Усиленная мотивация пациента осуществляется за счет управления нагрузкой с помощью биологической обратной связи при выводе текущего состояния на монитор (рис. 6).



Рис. 6. Вывод состояния пациента на монитор



Рис. 7. Комплекс Biodex System 3

Для задач ортопедии (взрослой и детской), спортивной медицины, производственной реабилитации, профилактики и лечения остеоартритов известен робот американской фирмы "Biodex". Принцип действия основан на электронной динамометрии. Система обеспечивает быструю и точную диагностику, лечение и документирование нарушений, являющихся причиной функциональных расстройств мышц и суставов. Система позволяет проводить мобилизацию суставов в направлении сгибание/разгибание, отведение/приведение и ротация, что необходимо для полноценного восстановления их утраченных функций.

В комплектацию входит набор приспособлений для работы с тазобедренным, коленным, плечевым и локтевым суставами, а также с голеностопом и запястьем. Общий вид системы, работающей с верхними и нижними конечностями, представлен на рис. 7.

Роботы для восстановления верхних и нижних конечностей были представлены на симпозиуме по медицинской робототехнике в Пенсильвании [12, 13]. На рис. 8 (см. третью сторону обложки) слева: манипулятор GENTLE's, разработка University of Reading, Великобритания; в центре: манипулятор ARMguide, разработка Rehabilitation Institute of Chicago; справа: манипулятор Manipulandum, разработка Rehabilitation Institute of Chicago.

На рис. 9 (см. четвертую сторону обложки) сверху слева: робот AutoAmbulator, разработка HealthSouth, США; сверху справа: тренажер для ходьбы, разработка University of California, США; внизу

слева: робот GaitMaster2, разработка University of Tsukuba, Япония, внизу справа: робот для движений конечностей, а также для массажа, разработка Российской академии наук, подробно описанная ниже.

Воздействия с помощью рассмотренных выше роботов относят к механотерапии. Механотерапия — метод лечебной физкультуры, основанный на выполнении дозированных движений (преимущественно для отдельных сегментов конечностей), выполняемых с помощью специальных приспособлений. Механотерапия применяется в качестве восстановительного лечения при различных двигательных расстройствах, когда необходимо увеличить амплитуду движений в суставах и силу определенных мышечных групп. На некоторых аппаратах можно заниматься сразу после оперативного вмешательства. Выбор движений, выполняемых на механотерапевтических аппаратах, определяется характером ограничения движений и анатомическими особенностями сустава.

4. Роботы для выполнения манипуляций на мягких тканях

История появления роботов в восстановительной медицине для массажа такова. В 1997 г. на втором форуме IARP по медицинской робототехнике была представлена только одна работа с использованием робототехники для восстановительной медицины — робот для массажа [9]. В 2002 г. на сайте голландской фирмы появился робот для массажа Tickle — щекочущая букашка. В 2003 г. появился российский патент — робот для шлейф-массажа [14]. В 2005 г. на сайте Силиконовой долины появилось сообщение [15] об использовании робота Puma для массажа. За основу этого робота была взята идея, изложенная в российской работе [16]. К сожалению, развитие этой разработки неизвестно. Перечисленные выше работы представляют большинство известных роботов для массажа, если не иметь ввиду многочисленных аппаратных средств для массажа.

Разнообразные аппаратные средства издавна применяются для облегчения труда массажиста, предупреждения профессиональных заболеваний кистей его рук. Простейшие из них: вибраторы, роллеры, насадки для акупунктуры и акупрессуры представ-



Рис. 10. Аппаратные средства восстановительной медицины

ляют средства механизации, которые перемещает массажист (рис. 10).

Следует заметить, что робот может быть носителем упомянутых аппаратных средств.

Более сложными являются средства автоматизации, например, массажные кресла. Массажные кресла (рис. 11) в качестве актуаторов имеют воздушные подушки с регулируемым давлением, ролики с управляемыми усилиями прижатия. Зоны воздействия массажа: шейно-плечевой отдел, спина, поясничный отдел, ягодицы, бедра, голени, ступни. Виды массажа: разминающий, похлопывающий, поколачивающий, вибрационный, Шиатсу. С пульта управления можно установить желаемый уровень интенсивности массажа.

Пользуются популярностью полуавтоматические аппаратные средства массажа, частично разгружающие массажиста. На рис. 12 показана рука производства американской фирмы Meilus, помогающая выполнять прижимные приемы.

Робот голландской фирмы Tickle весьма прост по конструкции (рис. 13). В металлическом корпусе находятся два электромотора, аккумуляторная батарея и четыре датчика, позволяющих следить за наклоном поверхности, по которой передвигается робот-массажист. Движение осуществляется с помощью двух силиконовых "гусениц", покрытых выступами, создающими массажный эффект. Принцип движения робота напоминает принцип движения танка: каждый из моторов приводит в движение свою гусеницу. Воздействия робота — поглаживающие и щекочущие, вызывающие эффект релаксации.

Робот для шлейф-массажа выполняет плоскостное, непрерывное, прямолинейное поглаживание на больших поверхностях тела (спина, грудь, живот, конечности). Такого рода поверхностное по-



Рис. 12. Прибор для мышечной терапии Meilus



Рис. 13. Робот Tickle в действии



Рис. 11. Массажные кресла

глаживание отличается особо нежными и легкими движениями, оказывающими успокоительное воздействие на нервную систему, вызывает мышечное расслабление и улучшение кровообращения. Конструкция робота представляет каретку с электродвигателем, перемещающуюся по траверсе вдоль тела пациента (рис. 14). Траверса профилирована по рельефу тела номинального пациента и не может быть перепрограммирована. С каретки свешиваются поглаживающие щетки и прижимаются к пациенту упругими пластинками.

В 2007 г. в Японии разработан робот для массажа лица WAO-1 (Waseda Asahi Oral Rehabilitation Robot 1). Робот (рис. 15) оснащен двумя 50-сантиметровыми щетками, которые перемещаются по поверхности лица пациента.

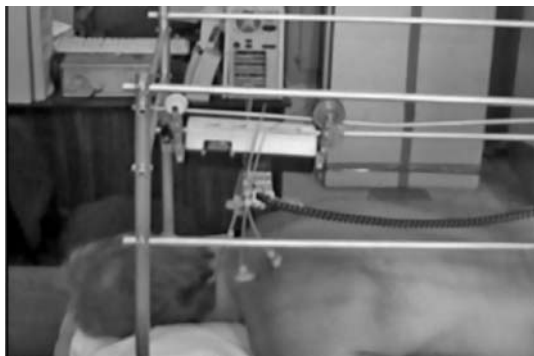


Рис. 14. Робот для шейф-массажа



Рис. 15. Робот для массажа лица WAO-1



Рис. 16. Робот для механотерапии (ГОУ МГИУ)

метровыми механическими руками, которые массируют лицо пациента с обеих сторон. Безопасность обеспечивается силовой ограничительной системой, которая раздвигает руки робота в стороны, стоит ему только приложить слишком большое усилие.

Лицевой массаж признан весьма эффективным средством борьбы с сухостью во рту, поскольку стимулирует дополнительное слюноотделение, а также помогает исправить нарушения ротовой структуры.

Эффективность аппаратных средств массажа определяется адекватностью механического контакта с пациентом. Этот контакт осуществляется через инструмент аппаратного средства. Поэтому в техниках, воспроизводящих руки человека, инструмент должен имитировать контактные свойства человеческой руки: упругость, теплоту, влажность, фрикционные свойства (шероховатость, гладкость, скользкость), координационные возможности (многопальцевость, способность захватывать). В большей степени перечисленные свойства может обеспечить многосуставный манипуляционный робот.

В Московском государственном индустриальном университете разработан робот для выполнения приемов массажа и движения конечностей в суставах [9, 16, 17, 18, 19, 20]. Основой этого робота является промышленный робот РМ-01, манипуляционная рука которого антропоморфна по размерам и кинематике (рис. 16). В контакте с телом робот развивает усилие до 60 Н. Необходимые усилия развиваются и контролируются за счет позиционно-силовой системы управления, расширяющей возможности штатного робота.

Шестиприводной робот с указанными данными может выполнять множество известных манипуляций непосредственно на мягких тканях, т. е. разнообразный массаж, а также манипуляции на суставах в виде пассивных и активных движений конечностей, постизометрической релаксации в виде сочетаний нагрузок и разгрузок мышц конечностей. На рис. 17 робот выполняет выжимание длинных мышц спины девочки.

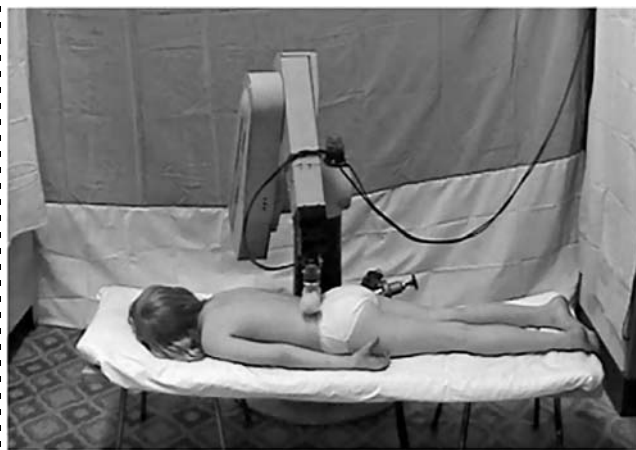


Рис. 17. Выполнение процедур на пациенте

5. Активные биоправляемые протезы верхних и нижних конечностей

Биопротезирование верхних и нижних конечностей, утраченных в результате травм или болезни опирается на более простые решения. Некоторые простейшие решения в какой-то степени лишь эстетически восстанавливают внешность конечностей, другие решения восстанавливают некоторые функции. На рис. 18 приведена классификация протезов, в которой выделены классы активных и биоправляемых протезов.

Разработанные на основе теории баллистических синергий [21] протезы нижних конечностей не являются активными и не используют биосигналы, но эффективно используют упругость пружин протезов.

В тяговых протезах верхних конечностей, вначале пассивных, движения схвата кисти вызывались за счет дополнительных движений сохранившейся части руки или за счет движения туловища. Передающим звеном вначале были гибкие тяги, впоследствии появились активные тяговые протезы,



Рис. 18. Классификация протезирующих устройств



Рис. 19. Протез коленного сустава Otto Bock

зы, в которых движения тяг воспроизводили встроенные двигатели.

Активными, но не биоправляемыми, являются миотонические протезы, в которых управляющими сигналами являются усилия инвалида. Датчики в виде микровыключателей или тензоэлементов измеряют эти усилия и передают на исполнительные приводы кисти.

Рассмотренные способы протезирования без использования биосигналов имеют ряд недостатков. Управляющие тяги обременяют инвалида, затрудняют движения плечевого пояса, число управляющих команд так же, как при миотоническом управлении, ограничено (одной-двумя командами). Помехами для управления являются случайные внешние толчки в гильзу культи протеза. Тем не менее, простейшие протезы разработаны в виде модульных конструкций и выпускаются серийно [22, 23].

Развитию биоправляемых протезов способствовали достижения в области электрофизиологии, биомеханики, микроэлектроники, адаптивных систем управления с обратными связями.

В настоящее время известна немецкая фирма "Otto Bock", серийно выпускающая пассивные и активные протезы. На рис. 19 приведен активный протез коленного сустава.

Наиболее значительные результаты по биопротезированию в 70...80-х гг. в России известны по работам ЦНИИ ПП [23]. В работах ЦНИИ ПП родилось принципиально новое направление в протезировании конечностей — создание протезов с биоэлектрической системой управления или биоправляемых протезов. Сущность нового принципа построения искусственных конечностей состоит в том, что управление внешними источниками энергии, за счет которой работает протез, в своей основе подобно естественной координации движений здорового человека.

В живом организме управляющие воздействия передаются мышцам посредством биоэлектрических импульсов, отражающих команды центральной нервной системы. Подобно этому в протезе руки с биоэлектрическим управлением роль командных сигналов выполняют биотоки, отводимые от усеченных мышц культи. Механизмом, исполняющим команды, является искусственная кисть, снабженная малогабаритным электрическим приводом с автономным питанием.

По материалам симпозиума 2004 г. в Пенсильвании [12, 13] известны активные протезы и экзоскелетоны, приведенные на рис. 20 (см. четвертую сторону обложки).

Одними из первых работ в области активных протезов и экзоскелетонов являются работы Миомира Вукобратовича [24]. Под его руководством были разработаны экзоскелетоны, в одном варианте с электрическими, в другом с пневматическими приводами тазобедренного, коленного и голеностопного суставов для обеих ног пациента (рис. 21).

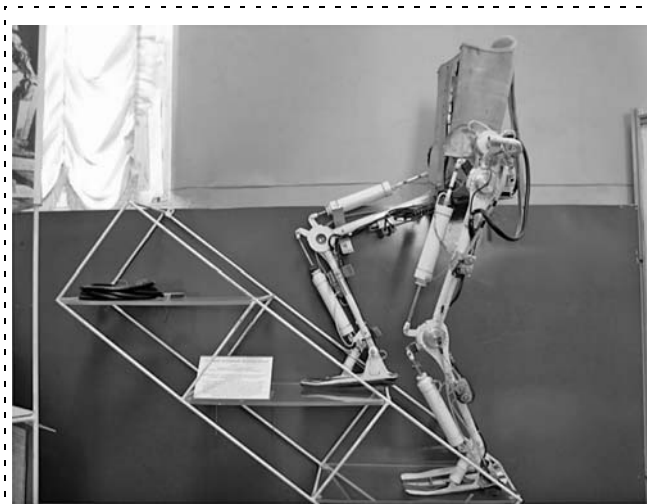


Рис. 21. Внешний вид экзоскелетона



Рис. 22. Роботизированный костюм Matsushita

Экзоскелетон предназначался для усиления дистрофически слабых мышц нижних конечностей человека во время ходьбы.

Японская компания Matsushita разработала роботизированный костюм, который поможет реабилитации частично парализованных людей (рис. 22). Когда человек, страдающий параличом на одну руку, делает движение здоровой рукой, парализованная рука делает то же самое движение, напрягая и сгибая компрессоры, которые играют роль мускулатуры. Повторяя движения здоровой руки, человек в роботизированном костюме может тренировать свою больную руку до восстановления нормального функционирования конечности.

Были проведены испытания костюма в госпитале, и планируется поставить производство на коммерческую основу. Приблизительная цена костюма для использования в реабилитационных клиниках составит 17000 \$, для домашнего использования — около 2000 \$.



Рис. 23. Роботизированный костюм HAL (Cyberdine)

Другая токийская компания Cyberdine разработала автоматизированный костюм HAL (Hybrid Assistive Limb) (рис. 23), который помогает пожилым людям и людям с ограниченными способностями ходить. Устройство с датчиками будет доступно в Японии за арендную плату, составляющую \$2200 в месяц. 22-фунтовая компьютерная система, работающая от батареи, крепится к талии. Она управляет приводами на скобах, которые крепятся ремнями к бедрам и коленям, и обеспечивают автоматизированную помощь во время ходьбы.

Заключение

1. Судя по публикациям организаций-разработчиков и медицинских центров, области применения медицинских роботов, в том числе для восстановительной медицины, расширяются, и спрос на них увеличивается.

2. Медицинские роботы в сравнении с другими аппаратными средствами имеют ряд преимуществ. Это — быстрая перепрограммируемость, высокая точность повторения движений, неутомимость, отсутствие субъективных факторов (добросовестность), дружественный интерфейс (психоэмоциональный контакт), партнерство (для детей — вовлечение в игры, в разнообразные движения, например, в утреннюю зарядку), а также адаптация к индивидуальным особенностям человека (позиционно-силовое управление), наличие интеллекта

(накопление опыта, анализ, генерация программ), повышенная безопасность за счет адаптации и интеллекта.

3. В сравнении с руками врача медицинские роботы сегодняшнего дня часто уступают в чувствительности и координации в сложных движениях.

4. Концепция разработки и внедрения роботов в восстановительную медицину для здоровых людей состоит в применении адаптивных и интеллектуальных роботов для сохранения и увеличения запасов здоровья населения, восстановлении работоспособности трудящихся.

5. При разработке и внедрении роботов в восстановительную медицину следует делать компромиссный выбор между многофункциональными роботами и экономичными специализированными с малым числом приводов.

6. Для разработанных аппаратных средств восстановительной медицины, включая роботы, манипулирующие на мягких тканях и суставах, активные и биоуправляемые протезы, эффективно используется тактильная и силометрическая информация как для разомкнутых, так и для замкнутых силовых и позиционно-силовых систем управления.

7. Биоинформация используется непосредственно как управляющие сигналы, образует замкнутые системы или образует биологические обратные связи через зрение и нервную систему человека.

Список литературы

1. Головин В. Ф. Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Тр. конф. "Мехатроника". 2008.
2. Саврасов Г. В. Медицинская робототехника: состояние, проблемы и общие принципы проектирования // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Спецвып. "Биомедицинская техника и технология. Сер. "Приборостроение", 1998.
3. Разумов А. Н., Головин В. Ф. Массаж как культура повседневной жизни здоровых людей // Вестник оздоровительной медицины. 2010. № 6.
4. Разумов А. Н. Здоровье здорового человека. М.: Медицина, 2007.
5. Разумов А. Н., Пономаренко В. А., Пискунов В. А. Здоровье здорового человека. М.: Медицина, 1996.
6. Дубровский В. И. Валеология. Здоровый образ жизни. М.: Retorika-A, 2001.
7. Разумов А. Н., Покровский В. И. Здоровье здорового человека, научные основы восстановительной медицины. М.: РАМН РНЦ ВМК, 2007.
8. Заблудовский В. И. Дисс. "Материалы к вопросу о действии массажа на здоровых людей". СПб., 1882.
9. Golovin V. F. Robot for massage // Proc. of JARP 2nd Workshop on Medical Robotics Heidelberg, Germany. 1997.
10. Biodex system 3. Manual, 20 Ramsay Road, Shirley, New York 11967—4704.
11. Ковражкина Е. А., Румянцев Н. А., Старицын А. Н., Суворов А. Ю., Иванова Г. Е., Скворцова В. И. Роботизированные механотренажеры в восстановлении функции ходьбы у больных с инсультом // Расмирби. № 1 (24). 2008. С. 11—16.
12. Assistive technologies // Proc. IARP, Workshop on medical robotics. Hidden Valley, Pennsylvania, USA, 2004.
13. Rehabilitation robotics // Proc. IARP, Workshop on medical robotics. Hidden Valley, Pennsylvania, USA, 2004.
14. Мансуров О. И., Мансуров И. Я. Способ аппаратного поверхностного массажа и реализующий этот способ робот для шлейф-массажа. Рос. патент № 2005130736/14 от 05.10.2005.
15. Jones Kenny C., Du Winncy. Development a Massage Robot for Medical Therapy // Proc. of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'03), July 23—26, 2003, Kobe, Japan. P. 1096—1101.
16. Golovin V. F., Grib A. N. Mechatronic system for manual therapy and massage // Proc. 8th Mechatronics Forum International Conference, University of Twente, Netherlands. 2002.
17. Golovin V. F. Robot for massage and mobilization // Proc. of workshop of AMETMAS-NoE, Moscow, Russia, 1998.
18. Golovin V. F., Grib A. N. Computer assisted robot for massage and mobilization // Proc. "Computer Science and Information Technologies", Conference Greece University of Patras, 2002.
19. Головин В. Ф., Саморуков А. Е. Способ массажа и устройство для его осуществления. Рос. патент № 2145833, 1998.
20. Головин В. Ф. Мехатронная система для манипуляции на мягких тканях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 7.
21. Питкин М. Р. Биомеханика построения протезов нижних конечностей. СПб.: Человек и здоровье, 2006. 131 с.
22. Конструкции протезно-ортопедических изделий / Под ред. А. П. Кужекина. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.
23. Якобсон Я. С., Морейнис И. Ш., Кужекин А. П. Конструкции протезно-ортопедических изделий / Под ред. А. П. Кужекина. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.
24. Вукобратович М. Шагающие и антропоморфные механизмы. М.: Мир, 1976.

ИНФОРМАЦИЯ

14—16 ноября 2011 г. в Москве
в ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН состоится

Международная научно-практическая конференция "Управление большими системами" (УБС'2011)

В рамках конференции планируется проведение:

- ♦ совместного пленарного заседания (14 ноября)
- ♦ IX конференции "Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций" (CASC'2011) (14—16 ноября)
- ♦ конференции "Теория активных систем — 2011" (ТАС) (14—16 ноября)
- ♦ конференции "Управление инновациями — 2011" (УИ) (14—16 ноября)
- ♦ XI Дружеских чтений (15 ноября)
- ♦ круглого стола "Проблемы управления большими системами" (16 ноября)

Подробную информацию см. на сайте конференции <http://www.ipu.ru/node/12525>

А. В. Жданов, канд. техн. наук, доц.,
zhdanov@vlsu.ru,

Владимирский государственный университет

Направления развития мехатронных модулей систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца пульсирующего типа

Приведены основные тенденции развития современных мехатронных модулей систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца, обеспечивающих пульсирующий кровоток. Приведена классификация систем, структурные схемы современных мехатронных модулей, сравнительные технические характеристики существующих и перспективных конструкций.

Ключевые слова: мехатронный модуль, система вспомогательного кровообращения, система искусственного сердца, имплантируемый модуль

К системам вспомогательного кровообращения (ВК) и искусственного сердца (ИС) предъявляются жесткие требования по нагрузочной способности; массе и габаритным размерам; надежности, долговечности и ресурсу; шуму и виброактивности; управляемости; плавности и др. Специальные требования по гемосовместимости материалов, эргономике, удобству эксплуатации и обслуживания

приводят к дополнительным сложностям при разработке этих систем, так как необходимо совмещение целого комплекса взаимопротиворечивых условий [4].

Для решения задач временной или постоянной замены естественного сердца в последние годы создаются различные системы поддержки кровообращения [1, 2, 3]. Стационарные аппараты активно используются и распространены в клинической практике, однако они неудобны для пациентов, поскольку ограничивают свободу перемещения и требуют постоянного контроля со стороны обслуживающего персонала. После широких экспериментальных испытаний встал вопрос о разработке автономных систем, которые обеспечивали бы пациенту свободу перемещения, позволяли бы осуществлять постоянную диагностику системы и не вызывали бы обширных инфекционных процессов. В настоящее время механический "мост" осуществляют имплантируемыми системами ВК и ИС на базе мехатронных модулей (ММ) различного типа. Системы ВК были впервые использованы в клинической практике в 1953 г., а системы ИС — в 1960 г. [2]. Преимущества и недостатки систем ВК и ИС представлены в табл. 1.

Основной задачей систем ВК и ИС является обеспечение естественного кровотока, который имеет прерывистую "пульсирующую" природу. ММ наиболее приемлемы для использования в пульсирующих имплантируемых устройствах, поскольку обладают хорошими регулировочными свойствами и высокими динамическими показателями при высокой надежности и большом сроке службы (табл. 2).

Таблица 1

Преимущества и недостатки существующих систем ВК и ИС

Примеры систем ВК и ИС	Достоинства	Недостатки
TCI HeartMate (США), ArrowLionHeart (США), Hokkaido Tokai LVAD, TAH (Япония), Baylor LVAD, TAH (США), Helmholtz LVAD (Германия), Jarvick 2000 (США) и др.	1. Электромеханический 1. Простота принципиальной схемы 2. Высокий КПД 3. Малый шум при работе 4. Высокая управляемость	1. Большое число движущихся деталей 2. Снижение срока службы и надежности
Novacor (США) и др.	2. Электромагнитный 1. Простота конструкции 2. Малое число движущихся деталей	1. Большая масса (соленоид и преобразователь тока) 2. Ограниченные возможности управления 3. Большая шумность при работе
HeartSaver (США), Abiocor (США), Cleveland CorAide (США), Thoratec VAD (США) и др.	3. Электрогидравлический 1. Малое число движущихся деталей 2. Возможность оптимизации объемной компоновки за счет пространственного решения преобразователя движения	1. Большая масса (за счет использования жидкости) 2. Уменьшение надежности за счет возможной протечки рабочей жидкости 3. Сложность конструкции 4. Сложность обеспечения качества управления
BerlinHeart (Германия), Medos VAD (Германия), CardioWest TAH (США—Канада), Jarvick 7 (США) и др.	4. Электропневматический 1. Малое число движущихся деталей 2. Возможность оптимизации объемной компоновки за счет пространственного решения преобразователя движения	1. Уменьшение надежности за счет возможной протечки рабочей жидкости 2. Необходимость дополнительных внешних устройств 3. Сложность обеспечения качества управления

Таблица 2

Классификация мехатронных систем ВК и ИС [3]

Название системы	Позиция [1, 2]	Тип [3]	Фирма-производитель
1. На стадии использования в клинике			
Novacor	И	ЭМ	World Heart Inc. (США)
TCI HeartMate	И	ЭМ	Thoratec (США)
Thoratec	П	ДП	Thoratec (США)
BerlinHeart	П	ДП	BerlinHeart GmbH (Германия)
Medos	П	ДП	MEDOS (Германия)
Toyobo	П	МП	TOYOBO (Япония)
Zeon	П	МП	Nihon-Zeon Co. (Япония)
2. В стадии клинических испытаний			
CardioWest	И	ДП	CardioWest (США)
ArrowLionHeart	И	ЭМ	ABIOMED Inc. (США)
MicroMed DeBakey	И	ЭМ	ABIOMED Inc. (США)
Jarvick 2000	И	ДП	CardioWest (США)
TCI HeartMate II	И	ДП	Thoratec (США)
AB 180	И	ЭГ	ABIOMED Inc. (США)
CardioVAD	И	ЭГ	CardioWest (США)
3. В стадии предклинических испытаний			
Thoratec IVAD	И	ЭГ	Thoratec (США)
WorldHeart	И	ЭС	World Heart Inc. (США)
HeartSaverVAD	И	ЭГ	World Heart Inc. (США—Канада)
AbiomedAbioCor	И	ЭГ	ABIOMED Inc. (США)
PennStateTAH	И	ЭМ	PennStateUniversity (США)
Terumo ILVAS	И	ЭМ	Terumo (Япония)
4. В стадии разработки			
Streamliner	И	ЭГ	Thoratec (США)
TCI HeartMate III	И	ЭМ	ABIOMED Inc. (США)
Cleveland CorAide	И	ЭГ	CardioWest (США)
HeartQuest, Novacor II и другие	И	ЭМ	World Heart Inc. (США)
В таблице обозначено: МП — мешотчато-пневматического типа; ДП — диафрагменно-пневматического типа; ЭМ — электромеханический, диафрагменного типа; ЭГ — электрогидравлический, мембранного типа; П — паракорпоральное подключение; Э — экстракорпоральное подключение; И — имплантируемое подключение.			

Таблица 3

Технические характеристики систем вспомогательного кровообращения

Параметр	Системы с реверсивным двигателем			Системы с неревверсивным двигателем
	Yamagata LVAD	Baylor LVAD	Hokkaido LVAD	HeartMate VE-LVAS
Производительность, л/мин	8	8	7,5	9,6
Габаритные размеры	Ø90 × 56	Ø97 × 52	Ø105 × 70	Ø97 × 53
Ход штока, мм	12,7	12,7	12	12
Масса устройства, г	380	620	Нет данных	870
Общий объем привода, мл	285	348	355	410

В настоящее время для ММ систем ВК и ИС пульсирующего типа можно выделить следующие основные тенденции развития:

1. *Миниатюризация модулей*, снижение массогабаритных показателей при увеличении функциональных характеристик и улучшении силовых и динамических параметров ММ.

В настоящее время существуют два типа ММ с двигателями постоянного тока — с реверсивным и неревверсивным двигателем. К первой группе относятся известные системы *Baylor LVAD*, *ArrowLionHeart* (США), *Swiss LVAD* (Швейцария), *Hokkaido LVAD* (Япония). В этих системах используется дополнительный преобразователь движения, который позволяет превратить реверсивное вращательное движение ротора двигателя в возвратно-поступательное движение исполнительного органа (мембраны). Преобразователь играет две функции: осуществляет преобразование вращения в поступательное движение и обеспечивает механическую редукцию. В качестве таких механизмов выступают следующие устройства: *Baylor LVAD*, *ArrowLionHeart* (США), *Swiss LVAD* (Швейцария), *Yamagata LVAD* (Япония) — роликвинтовой механизм (РВМ); *Hokkaido LVAD* (Япония) — шариковинтовой механизм (ШВМ). В состав имплантируемого привода входит бесконтактный многополюсный (число пар полюсов p не менее 3) двигатель постоянного тока, внутрь которого встраивается данный редуктор. ММ первой группы выполняются как с металлическим (из титанового сплава), так и с полиуретановым искусственным желудочком сердца. Недостатками данной группы являются повышенное потребление энергии (из-за реверса двигателя), большое число движущихся элементов, влияющих на надежность устройства. Масса и габаритные размеры приводов данной группы значительно ниже, чем у всех других устройств. Система управления позволяет обеспечить нужное соотношение систола/диастола и частоту пульсаций. В последнее время появились новые источники питания, системы чрескожной передачи энергии, перспективные конструкции редукторов и двигателей, что позволяет данным системам завоевывать большую часть данного рынка [3].

Ко второй группе устройств относится система ВК *HeartMate VE-LVAS*. В ней двигатель вращается всегда в одну сторону, а реверс движения осуществляется пространственным кулачковым механизмом. Для данного устройства используется тихоходный многополюсный двигатель с редкоземельными магнитами специальной конструкции. Это позволяет обеспечить требуемое усилие на выходной мембране без промежуточного редуктора. Недостатками данной группы являются большие габаритные размеры и масса редуктора (примерно в 1,5 раза больше, чем у первой группы), жесткое соотношение систола/диастола (задается профилем кулачкового механизма). Однако высокая надежность, производительность и высокие гемоди-

53

намические показатели позволяют этим системам успешно конкурировать с другими устройствами. В табл. 3 представлены основные технические характеристики ММ имплантируемых систем ВК пульсирующего типа.

2. Увеличение "доли" имплантируемой части системы (табл. 4). На начальных этапах система управления (СУ) выполнялась в наружном варианте на поясе пациента, однако в системе *ArrowLionHeart* выполнена в виде отдельного имплантируемого блока или непосредственно встраивается в блок насоса (*Novacor II*).

3. Усложнение алгоритмов и систем управления, качественное улучшение управляемости и создание удобных интерфейсов. Наиболее приближенным к естественному пульсирующему кровотоку следует признать алгоритм по объемному наполнению искусственного желудочка сердца (ИЖС), когда СУ ММ оценивает требуемый объем заполнения ИЖС, после чего происходит реверс двигателя. Это позволяет менять объем выброса в зависимости от нагрузки на пациента. В последнее время разработаны сложные алгоритмы работы для неревверсивных систем (например, системы ВК с аксиальными насосами *Jarvick 2000*, *Berlin Heart Incor*, *DeBakeyVAD*, с объемным насосом *HeartMate VE-LVAS* и др.), что позволяет приблизиться к пульсирующему режиму и обеспечить отсутствие зон стагнации при постоянной работе насоса. Такое усложнение позволяет значительно разгрузить механическую часть ММ и существенно снизить массогабаритные характеристики. Так, масса *Berlin Heart Incor* составляет 284 г, габаритные размеры насоса *DeBakeyVAD* — 71 × 30 мм, масса — 235 г.

4. Применение наукоемких технологий, методов проектирования и изготовления ММ систем ВК и

ИС. Большинство разработок базируются на современной высокотехнологической базе ведущих университетов и фирм. Так система *DeBakeyVAD* выпускается в компании *MicroMed Cardiovascular* по лицензии и разработкам *NASA*, системы *Berlin Heart* — на базе Фраунгоферовского университета. Для проектирования и моделирования все разработчики используют системы сквозного проектирования (CAD/CAM/CAE-системы — Pro/ENGINEER, CATIA и др.), при изготовлении используются современные материалы и гемосовместимые покрытия.

Среди тенденций развития ММ систем ВК и ИС, кроме указанных выше, сохраняются традиционные направления, характерные для всех мехатронных систем [6]: снижение шума и увеличение плавности работы, повышение надежности и долговечности, снижение энергопотребления и другие.

Список литературы

1. Ганин В. П., Морозов В. В., Жданов А. В. Биотехнические и медико-биологические аспекты разработки имплантируемых систем обхода левого желудочка пульсового типа. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2007. 180 с.
2. Hunt S. A., Frazier O. H., Myers T. J. Mechanical Circulatory support and cardiac transplantation // *Circulation*. 1998. V. 97. P. 2079—2090.
3. Шумаков В. И., Толпекин В. Е., Шумаков Д. В. Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение. М.: Янус, 2003. 376 с.
4. Морозов В. В., Жданов А. В., Новикова Е. А., Новикова Ю. А., Костерин А. Б. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей: Монография. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2006. 134 с.
5. Морозов В. В., Жданов А. В., Новикова Е. А. Синтез имплантируемых систем вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей // *Мехатроника, автоматизация, управление*. Приложение. 2007. № 8. С. 2—5.
6. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Конструирование мехатронных модулей: Учеб. М.: ИЦ МГТУ "СТАНКИН", 2004. 360 с.

ИНФОРМАЦИЯ

3—8 октября 2011 г.
в пос. Дивноморское Геленджикского района состоится
**4-я Всероссийская мультиконференция
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2011)**

Председатель Президиума мультиконференции — академик РАН В. Г. Пешехонов

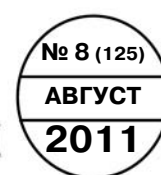
Состав мультиконференции

- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И УПРАВЛЕНИЕ" (ИИУ-2011)
Председатель программного комитета — академик РАН С. В. Васильев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)
Председатель программного комитета — член-корреспондент РАН Е. Д. Теряев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция
"УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ" (УРСИМС-2011)
*Сопредседатели программного комитета: член-корреспондент РАН И. А. Каляев
член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов*

*Подробная информация о мультиконференции размещается на сайте:
<http://www.mvs.tsure.ru>*



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Ву Суан Хьюнг.

Контроль и управление безопасным движением транспорта
при встречном движении 56

Заболотнова О. Ю.

Решение задач управления и оценивания при программном
развертывании космической тросовой системы 61

Девятисильный А. С., Числов К. А.

Методы построения устойчивых двухкомпонентных инерциаль-
ных навигационных систем на основе интерпретации радиаль-
ной информации 67

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,

Чан Ван Туен, аспирант,

Бу Суан Хьюнг, аспирант,

tuyenmoscow2005@yahoo.com,

Московский авиационный институт

(государственный технический университет)

Контроль и управление безопасным движением транспорта при встречном движении*

Ставится задача одновременного контроля безопасности встречного движения подвижных объектов и управления ими с помощью автоматических средств. Предложена объединенная двухуровневая структура контроля и управления, обеспечивающая путем адаптивной перестройки регуляторов необходимую безопасность обхода препятствий.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, динамическое программирование, функция риска

Введение

При управлении подвижными объектами различного класса, такими как наземный городской транспорт, летательные аппараты при маловысотном полете, речные и морские суда, возникает проблема обеспечения безопасности движения при встрече с различными препятствиями. Существующие методы автоматического управления позволяют синтезировать структуры линейных регуляторов в аналитической форме, однако они не дают оценки степени риска при опасном сближении с препятствием.

Между тем, при ручном управлении человек испытывает реальные ощущения нарастания тревоги в случае недопустимого снижения безопасности движения, что вызывает последующую перестройку способа обхода препятствий. Поэтому целью настоящей работы является воспроизведение поведения человека путем количественной оценки текущего риска при движении с помощью предложенной системы контроля и, главное, последующей перестройки системы управления на примере обхода препятствий при встречном движении.

Постановка задачи синтеза оптимального управления без контроля безопасности движения

Начальная постановка задачи в случае бокового движения без встречи с препятствием может быть сформулирована следующим образом на примере управления речным транспортом (рис. 1).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки по проекту НК-528П/58ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" контракт П-787.

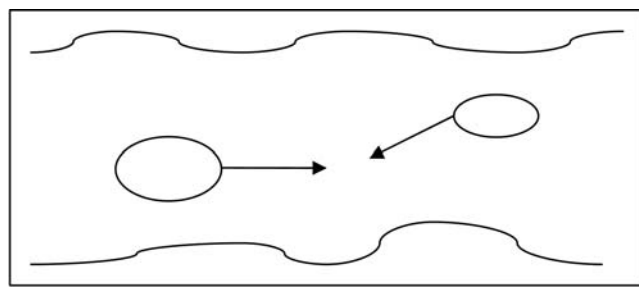


Рис. 1. Схема встречного движения двух подвижных объектов в горизонтальной плоскости

1. Пусть движение транспорта описывается динамической системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} x_1' = dx_2 + C_1; \\ x_2' = -ax_2 + bu, \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 — боковое отклонение судна от заданной траектории (фарватера); x_2 — боковая скорость судна; C_1 — боковая скорость течения; a, b, d — параметры объекта управления; u — управление.

2. Поступательное движение транспорта происходит с заданной постоянной скоростью v_1 , в результате чего меняется длина u пройденного пути.

3. Задан интегральный критерий качества

$$J = \int_0^{t_k} f_0(x, u, t) dt, \quad (2)$$

где $f_0 = r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{x_1^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2}$; r_0 — штраф за расходуемую мощность при управлении рулем; r_1 — штраф за отклонение от фарватера; r_2 — штраф за боковую скорость; $x = (x_1, x_2)$, x_1 — удаление от фарватера или боковой путь; x_2 — боковая скорость судна.

Требуется решить прямую задачу динамического программирования, чтобы найти функцию управления $u = f(x_1, x_2)$.

Синтез оптимального управления без учета оценки безопасности движения

Решение прямой задачи методом динамического программирования может быть получено следующим образом. Запишем функцию Беллмана в виде степенного полинома:

$$\varepsilon = \beta_1 x_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \psi x_1 x_2 + \beta_2 x_2 + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2};$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi x_2; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1;$$

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_u \left\{ f_0 + \sum \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} x_i' \right\}, \quad (3)$$

где β_i, γ_i, ψ — искомые коэффициенты функции Беллмана.

Запишем уравнение Беллмана, представив функцию Беллмана ε в виде степенного полинома:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{x_1^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2} + \\ &+ (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi x_2) x_1' + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1) x_2'; \\ -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{x_1^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2} + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi x_2) \times \\ &\times (dx_2 + C_1) + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1)(-ax_2 + bu) = \\ &= F(u, x_1, x_2) = \left[r_0 \frac{u^2}{2} + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1) bu \right] + \\ &+ \frac{x_1^2}{2} r_1 + r_2 \frac{x_2^2}{2} + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi x_2)(dx_2 + C_1) - \\ &- (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1) ax_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Оптимизируем функцию риска F по параметру u , тогда получим:

$$u_{\text{опт}} = -\frac{b}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi x_1). \quad (5)$$

Подставим управление (5) в уравнение Беллмана (4) и представим правую часть уравнения Беллмана степенным рядом:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \left[-\frac{b^2}{r_0} \beta_2 \psi + \gamma_1 C_1 \right] x_1 + \\ &+ \left(-\frac{b^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 + \beta_1 d + \psi C_1 - a \beta_2 \right) x_2 + \\ &+ \left(-\frac{b^2}{r_0} \psi^2 + r_1 \right) \frac{x_1^2}{2} + \left(-\frac{b^2}{r_0} \gamma_2^2 + r_2 + \right. \\ &+ \left. 2d\psi - 2\gamma_2 a \right) \frac{x_2^2}{2} + \left(-\frac{b^2}{r_0} \gamma_2 \psi + \gamma_1 d - a\psi \right) x_1 x_2 + \\ &+ \left[-\frac{b^2}{2r_0} \beta_2^2 + \beta_1 C_1 \right] = F(x_1, x_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Приравнявая сомножители при одинаковых степенях, группируем их по степеням и получаем систему дифференциальных уравнений. Заменив дифференциальные уравнения алгебраическими при $-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$, окончательно найдем следующее решение:

$$\begin{aligned} -\frac{b^2}{r_0} \beta_2 \psi + \gamma_1 C_1 &= 0; \\ -\frac{b^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 + \beta_1 d + \psi C_1 - a \beta_2 &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$-\frac{b^2}{r_0} \psi^2 + r_1 = 0;$$

$$-\frac{b^2}{r_0} \gamma_2^2 + r_2 + 2d\psi - 2\gamma_2 a = 0;$$

$$-\frac{b^2}{r_0} \gamma_2 \psi + \gamma_1 d - a\psi = 0.$$

Подставив два коэффициента β_2, γ_2 решения (7) в выражение (5), определим окончательные выражения для оптимального управления

$$\begin{aligned} u &= -\frac{b}{r_0} \left\{ \frac{r_0}{b^2} \frac{C_1}{d} \left[a + \frac{b^2}{r_0} \left(\frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) \right] + \right. \\ &\left. + \left(\frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) x_2 + \psi x_1 \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Найденное решение можно усложнить, если рассмотреть случай встречи с неподвижным препятствием (островом), при котором задан интегральный критерий качества в виде

$$J = \int_0^{t_k} f_0(x, u, t) dt,$$

где $f_0 = r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{x_1^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2} + r_3 \frac{(x_1 + C - D)^2}{2}$ — подинтегральное выражение функционала J , учитывающего теперь штраф r_3 за приближение к неподвижному препятствию; C_0 — расстояние от фарватера до острова; D — дистанция от управляемого объекта до острова.

Тогда можно показать, что оптимальное управление имеет вид

$$\begin{aligned} u &= -\frac{b}{r_0} \left[\frac{C_1}{d} \left(\frac{r_0 a}{b^2} + \frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) + \right. \\ &\left. + (C_0 - D) \psi \frac{r_3}{r_1 + r_3} + \left(\frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) x_2 + \psi x_1 \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } \psi = \sqrt{\frac{r_0(r_1 + r_3)}{b^2}}.$$

Было проведено моделирование на ЭВМ движения судна на примере стабилизации бокового пути вблизи фарватера при условиях: $r_0 = 1, r_1 = 4, r_2 = 2, r_3 = 16, d = 1, D = 20$ м, $C_0 = 10$ м, $a = 0,5, b = 0,1, C_1 = 0$.

Как показано на рис. 2, неподвижное препятствие заблаговременно обходится судном при найденном управлении:

$$u = 35,77 - 9,14x_2 - 4,47x_1. \quad (10)$$

Также можно решить прямую задачу оптимального управления обходом малопротяженного препятствия, если задать интегральный критерий в виде

$$J = \int_0^{t_k} f_0(x, u, t) dt, \quad (11)$$

$$f_0 = r_0 \frac{u^2}{2} + r_1 \frac{x_1^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2} + M(y_1) \frac{(x_1 + C_0 - D)^2}{2},$$

где $M(y_1) = r_3 \frac{D^2}{1 + (x_1 + C_0)^2 + y_1^2}$ — выбранная новая

переменная штрафная функция удаления от препятствия на расстояние y_1 .

Тогда более детализированно закон управления объемом может быть записан в виде

$$u = -\frac{b}{r_0} \left[\frac{C_1}{d} \left(\frac{r_0 a}{b^2} + \frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) + \right. \\ \left. + (C_0 - D) \psi \frac{M}{r_1 + M} + \left(\frac{r_2}{2a} + \frac{d}{a} \psi \right) x_2 + \psi x_1 \right], \quad (12)$$

$$\text{где } \psi = \sqrt{\frac{r_0(r_1 + M)}{b^2}}.$$

Полученный результат позволяет промоделировать движение судна, подтвердив факт возвращения судна на фарватер после обхода препятствия (рис. 3).

Проведенное моделирование также показало, что при начале маневрирования на малых дистанциях судно не успевает безопасно обойти препятствия, что отражается на значении функции риска в виде правой части уравнения Беллмана $F(x)$. Оказалось, что эта функция увеличена при малых дистанциях маневрирования (рис. 4) и поэтому может быть использована для *контроля безопасности движения*.

Оценка спрогнозированной функции риска при встречном движении

Чтобы обеспечить более точную оценку функции риска, учтем такой важный фактор, как скорость сближения судна с препятствием. С этой целью решим следующую дополнительную задачу.

1. Заданы уравнения бокового и поступательного движения

$$\begin{cases} x_1' = dx_2 + C_1; \\ x_2' = -ax_2 + bu; \\ y_1' = -v_1. \end{cases}$$

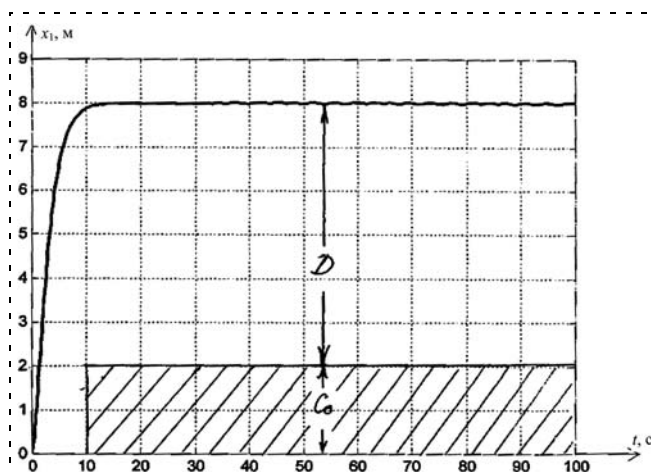


Рис. 2. Процесс обхода неподвижного протяженного препятствия слева при $C_0 = 2$ м, $D = 6$ м, $C_1 = 0$

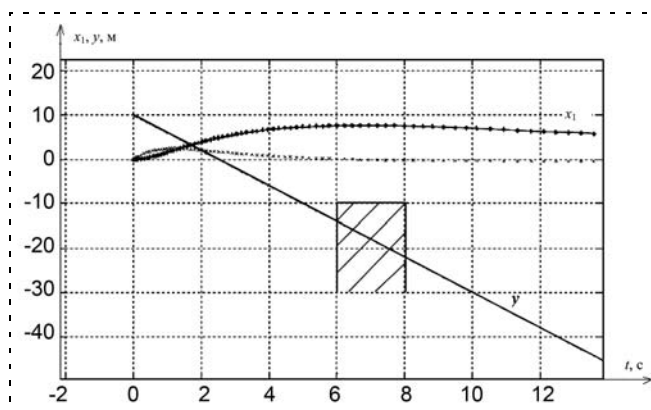


Рис. 3. Процесс маневрирования для бокового движения судна при обходе малоразмерного препятствия

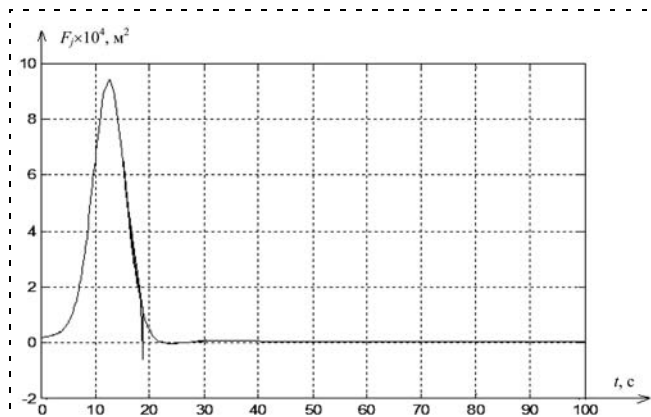


Рис. 4. Функция риска при условиях $y_0 = 50$, $r_3 = 100$, $r_1 = 4$, $v_{\max} = v_{\min} = 4$ м/с

2. Задан переменный штраф за сближение с препятствием

$$III = \frac{r_3}{2} \frac{[x_1 - (z - D)]^2}{1 + \frac{y^2}{(x_1 + D)^2}}.$$

3. Представим в данном случае функцию Беллмана по-новому по сравнению с (3) — с учетом координаты y :

$$\varepsilon = \alpha + \beta_1 x_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \beta_2 x_2 + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \beta_3 y + \gamma_3 \frac{y^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 y + \psi_{23} x_2 y + \theta y^2 x_2 + p y^2 x_1 x_2,$$

где ψ_{13} , ψ_{23} , β_3 , γ_3 , θ , p — дополнительные коэффициенты функции Беллмана.

Это позволяет записать уравнение Беллмана в новом усложненном виде:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = F(x_1, x_2, v_1, y) = \min_{u_1} \{ r_0 \frac{u_1^2}{2} + r_1 \frac{(x_1 - m)^2}{2} + \\ + r_2 \frac{x_2^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{r_3 (x_1 - z + D)^2}{1 + \frac{y^2}{(x_1 + D)^2}} + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \\ + \phi y^2 + \psi_{13} y + p y^2 x_2)(dx_2 + C_1) + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \\ + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y + \theta y^2 + p y^2 x_1)(-ax_2 + bu_1) - \\ - (\beta_3 + \gamma_3 y + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2 + 2\theta y x^2 + 2p y x_1 x_2) v_1 \}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оптимизируем функцию риска в виде правой части уравнения Беллмана по параметру u_1 . Тогда получим оптимальное управление u_1 в виде линейного регулятора:

$$u_1 = -b(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y + \theta y^2 + p y^2 x_1). \quad (14)$$

Дополнительно заметим, что нужный вид полинома был найден при замене функции штрафов $M(y)$ на следующее приближение:

$$\begin{aligned} \frac{r_3 (x_1 - z + D)^2}{2 \left(1 + \frac{y^2}{(x_1 + D)^2} \right)} \approx r_3 (D - z) x_1 + r_3 \frac{x_1^2}{2} - \\ - \frac{2(D - z)^2}{D^2} \frac{y^2}{2} r_3 - \frac{z(D - z) r_3}{D^3} y^2 x_1 + \frac{r_3 z}{D^4} (D - 1,5z) y^2 x_1^2. \end{aligned}$$

В результате удастся вычислить искомые коэффициенты функции Беллмана, если задаться максимальным расстоянием $y_{\max}$ до препятствия, гарантирующим его безопасный обход:

$$\begin{aligned} \gamma_1 = \psi_{12}(a + b^2 \gamma_2) = \psi_{12} B; \gamma_2 = \frac{1}{a} (\psi_{12} + 0,5 r_2); \\ \gamma_3 = -\frac{b^2 \beta_2 \psi_{23}}{v_1}; \beta_1 = \beta_2 B + v_1 \psi_{23}; \\ \beta_2 = \frac{1}{b^2 \psi_{12}} \left[A - \frac{2B^2 v_1^2}{b^4 \psi_{12}^3} (B \psi_{12} - 2pA) \right]; \beta_3 \approx -\gamma_3 y_{\max}; \\ \psi_{12} = \frac{\sqrt{r_1 + r_3}}{b}; \psi_{13} = B \psi_{23} + 2v_1 \theta; \end{aligned}$$

$$\psi_{23} = \frac{2Bv_1}{b^4 \psi_{12}^3} (B \psi_{12} - 2pA) \left(1 + \frac{2pB^2 v_1^2}{b^4 \psi_{12}^3} \right);$$

$$B = a + b^2 \gamma_2; A = r_3 (D - z) - r_1 m; B = -\frac{z(D - z) r_3}{D^3};$$

$$p = \frac{r_3 z (D - 1,5z)}{D^4 b^2 \psi_{12}}; \theta = \frac{B}{b^2 \psi_{12}}.$$

С помощью найденных коэффициентов можно определить закон управления u_1 как явную функцию от пяти параметров x_1 , x_2 , y , C_0 , D . Полученные результаты позволяют промоделировать движение судна, при котором после обхода препятствия судно возвращается на фарватер.

Также можно проанализировать зависимость найденной функции текущего риска $F(x_1, x_2, v_1, y)$ от скорости сближения с препятствием. Как видно из формулы (13), в функцию риска входят члены, явно зависящие от скорости v_1 сближения с судном, а именно — последнее слагаемое, а в нем, в первую очередь, решающим является коэффициент γ_3 , от которого однозначно зависит коэффициент β_3 , и эти коэффициенты имеют в сумме отрицательный знак. Значит, функция F растет при увеличении скорости сближения v_1 с препятствием. Это также соответствует физическому смыслу — чем "быстрее" движение, тем это опаснее. Этот факт можно проиллюстрировать графиками на рис. 5, которые подтверждают высказанное утверждение.

До сих пор боковое движение самого препятствия не учитывалось — оно считалось неподвижным. Между тем встречное судно или любой другой плывущий предмет может представлять существенную угрозу безопасности.

Поэтому надо дополнить предыдущую модель новыми элементами. К ним относится, в первую очередь, дифференциальное уравнение движения

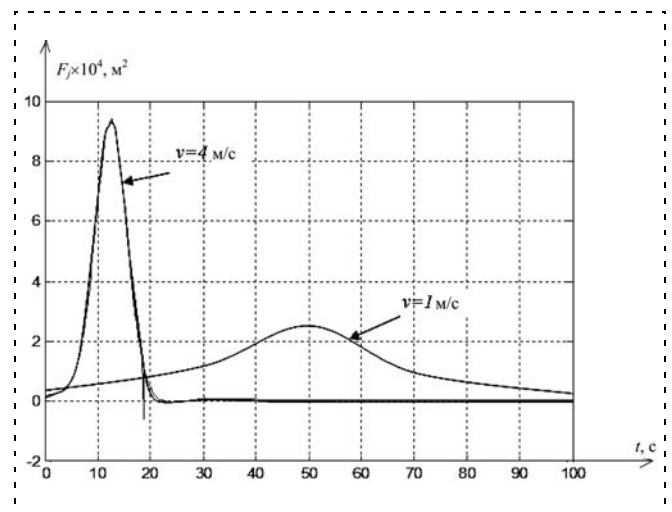


Рис. 5. Функция риска при условиях $y_0 = 50$, $r_3 = 100$, $r_1 = 4$, $v_{\max} = v_{\min} = 1$ м/с и $v_{\max} = v_{\min} = 4$ м/с

препятствия, поэтому общая динамическая модель примет следующий вид:

$$\begin{cases} x'_1 = x_2; \\ x'_2 = -ax_2 + bu; \\ y'_1 = -v_1; \\ z' = v_2, \end{cases} \quad (15)$$

где v_2 — известная скорость движения препятствия, положение которого характеризуется меняющейся координатой z бокового движения. Также по-прежнему должна быть представлена функция Беллмана:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 y_1 + \beta_4 z + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \\ & + \gamma_3 \frac{y_1^2}{2} + \gamma_4 \frac{z^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 y_1 + \psi_{14} x_1 z + \\ & + \psi_{23} x_2 y_1 + \psi_{34} y_1 z + \theta y^2 x_2 + p y^2 x_1 x_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Решение задачи позволяет окончательно найти в квадратурах новое оптимальное управление:

$$u_1 = -b(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} z). \quad (17)$$

В отличие от ранее найденного решения управление боковым движением судна учитывает скорость v_2 движения препятствия. Это обеспечивает дополнительную безопасность обхода препятствия такого типа, представляющего наибольшую угрозу.

Двухуровневая структура контроля и управления безопасным встречным движением

После того, как стал ясен факт очевидного роста функции риска при сближении с препятствием, остается сделать последний шаг — осуществить контроль этой функции риска и затем повлиять на скорость движения судна. А именно — в случае недопустимого снижения безопасности бокового маневра необходимо дополнительно предпринять аварийное снижение скорости поступательного движения вплоть до полного торможения.

Для этого нужно сравнить контролируруемую текущую функцию риска F с некоторым порогом $F_{\text{доп}}$, при котором экспериментально доказана успешность обхода препятствия на высокой скорости v_{max} . Тогда разность $F - F_{\text{доп}} = \Delta F$ дает нужную команду на управление поступательным движением. Если ΔF

положительна, то нужно снизить скорость хода судна до значения v_{min} , если разность ΔF отрицательна, то — увеличить до заданного значения v_{max} .

Этот способ повышения безопасности можно реализовать с помощью следующей динамической модели:

$$\begin{cases} y'_1 = -v_1; \\ v'_1 = \frac{1}{\tau} [0,5(v_{\text{max}} + v_{\text{min}}) + \\ + 0,5(v_{\text{min}} - v_{\text{max}})\text{sign}(F - F_{\text{max}}) - v_1], \end{cases} \quad (18)$$

где τ — постоянная времени аperiodического звена, обеспечивающего постепенное снижение скорости хода судна v_1 по экспоненте.

Приведенные соображения можно отобразить в виде принципиально новой двухуровневой структуры управления и контроля безопасности встречного движения, представленной на рис. 6.

На рис. 6 канал бокового движения нижнего уровня осуществляет управление обходом препятствия, но если он не справляется с задачей обеспечения безопасности, то верхний уровень контроля формирует сигнал тревоги, подающий команду на другой канал нижнего уровня, управляющий поступательным движением.

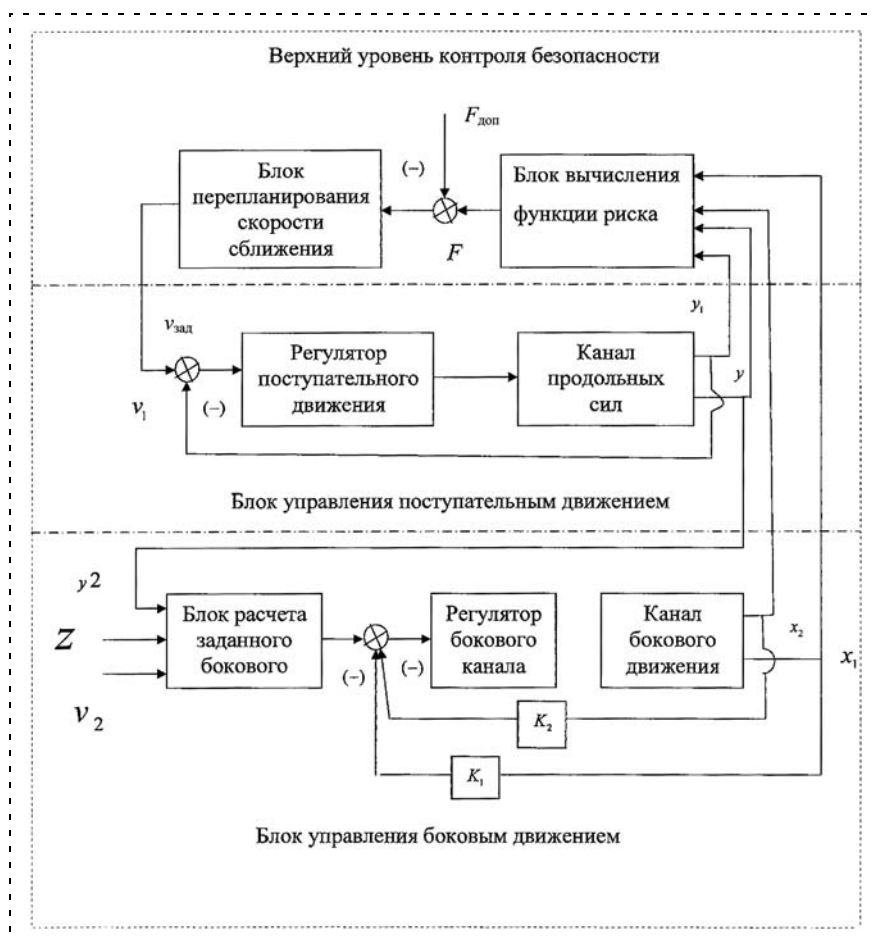


Рис. 6. Двухуровневая структура контроля и управления безопасным встречным движением

В этом случае скорость хода судна снижается, а безопасность движения возрастает до нужной величины, и задача управления судном в целом будет успешно решена.

Выводы

1. При синтезе линейных регуляторов управления боковым движением для обхода препятствий необходимо учитывать в подынтегральной функции интегрального критерия факт сближения с препятствием.

2. Найдена окончательная структура перестраиваемых регуляторов бокового и поступательного движения за счет использования сигнала тревоги в процессе управления при встрече с подвижным препятствием. Эта структура имеет на своем входе координаты бокового движения судна x_1 и x_2 , координаты y_1 и z поступательного движения судна и

бокового движения препятствия, а также скорости v_1 и v_2 объекта и препятствия.

3. Предложена объединенная двухуровневая система контроля и управления, способная адаптивным путем обеспечить необходимую безопасность движения.

4. Полученная система может использоваться как в автоматическом режиме, если доступна нужная измерительная информация об относительном сближении с препятствием, так и в тренажерах обучения операторов ручного управления при использовании сигналов тревоги в качестве подсказки.

Список литературы

1. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИИЛ, 1961.
2. Лебедев Г. Н. и др. Теория оптимальных систем. М.: Изд. МАИ, 1999.

УДК 004.94

О. Ю. Заболотнова, аспирант,

o.zabolotnova@inbox.ru,

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С. П. Королева

(национальный исследовательский университет)

Решение задач управления и оценивания при программном развертывании космической тросовой системы

Анализируются алгоритмы регулирования и оценки переменных состояния, предназначенные для работы в составе системы управления при программном развертывании космической тросовой системы. Осуществляется синтез регулятора и классического линейного фильтра Калмана, предназначенного для оценки состояния объекта управления при наличии ошибок измерений. Ошибки измерений представляют собой гауссов векторный белый шум. Проводится сравнение фильтра Калмана и предлагаемого нелинейного фильтра. Приводится пример работы алгоритмов при развертывании космической тросовой системы, предназначенной для спуска капсулы в заданный район земной поверхности.

Ключевые слова: космическая тросовая система, оптимальный регулятор, фильтр Калмана, нелинейный фильтр, математическая модель, нелинейное программирование

Космическая тросовая система (КТС) как объект управления имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов регулирования. Управление КТС происходит на орбите при ее движении в гравитационном поле Земли (или других планет). Поэтому отличие гравитационных ускорений, действующих на отдельные части КТС, небольшое, и неверное управление может привести к провисанию троса. Трос —

это односторонняя механическая связь, не воспринимающая сжимающих усилий. Особенно это важно учитывать на начальном этапе развертывания КТС, когда расстояние между концевыми телами тросовой системы составляет несколько метров. Провисание троса приводит к потере управляемости, и целевая задача по формированию конечной конфигурации тросовой системы становится невыполнимой. Другой причиной неудачного развертывания может служить обрыв троса, который происходит при достижении некоторой предельной силы натяжения. Обрыву троса, как правило, предшествует неконтролируемый выпуск троса с большими ускорениями, который обычно приводит к ударным явлениям в системе. Ударные явления приводят к недопустимым усилиям и происходят, как правило, или из-за заедания троса в механизме управления или после того, как весь трос развернут. Из вышесказанного следует, что при разработке алгоритмов регулирования необходимо учитывать ограничения на силу натяжения троса и особенности работы механизма управления. В настоящее время, в основном, используются механизмы управления, которые лишь подтормаживают трос и не могут втягивать его обратно. Примером такого механизма может служить механизм управления, примененный в тросовом космическом эксперименте YES2 [1] на космическом аппарате (КА) "Фотон МЗ" (сентябрь 2007 г.).

Движение КТС при ее развертывании с базового КА описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнения движения концевых тел, троса и уравнения функционирования управляющего механизма. При проектировании системы управления (СУ) необхо-

димо учитывать неизбежно возникающие случайные ошибки измерений длины и скорости выпуска троса, влияющие на процесс управления. Одним из способов, повышающих качество регулирования при действии случайных помех, является применение динамических фильтров, включаемых в структуру системы управления. Классическим методом динамической фильтрации является использование фильтра Калмана [2], параметры которого рассчитываются по линейной математической модели объекта управления. Однако математическое моделирование работы линейного фильтра с использованием нелинейной модели движения КТС, учитывающей характерные особенности объекта управления, показывает, что возникает систематическая ошибка в оценке переменных состояния системы. В связи с этим в работе в качестве динамического фильтра предлагается использовать достаточно простую нелинейную модель движения КТС, записанную в орбитальной подвижной системе координат. Данная нелинейная модель хорошо известна и применяется при решении многих задач анализа и синтеза движения космических тросовых систем (см., например, [3]). Использование такого нелинейного фильтра, учитывающего физическую сущность рассматриваемой задачи управления, позволяет достаточно просто уменьшить влияние ошибок измерений на работу СУ.

Задача нелинейной динамической фильтрации не является новой и рассматривалась ранее во многих работах [2, 4]. Как правило, при построении нелинейных динамических фильтров используется та или иная процедура линеаризации [2], и метод расчета параметров нелинейных фильтров сводится к решению похожих, но более сложных, чем при расчете динамических фильтров Калмана, линейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В данной работе для оптимальной настройки параметров фильтра используются методы нелинейного программирования, минимизирующие предлагаемый критерий оптимальности на решениях нелинейной математической модели движения КТС.

В качестве примера приводится расчет параметров динамического фильтра для номинальной программы разворачивания КТС, предназначенной для спуска капсулы на тросе в заданный район земной поверхности. Принципиальная схема системы управления с динамическим фильтром приводится на рис. 1. Эффективность использования динамического нелинейного фильтра подтверждается численным моделированием процессов разворачивания КТС по нелинейной математической модели движения КТС, записанной в неподвижной геоцен-

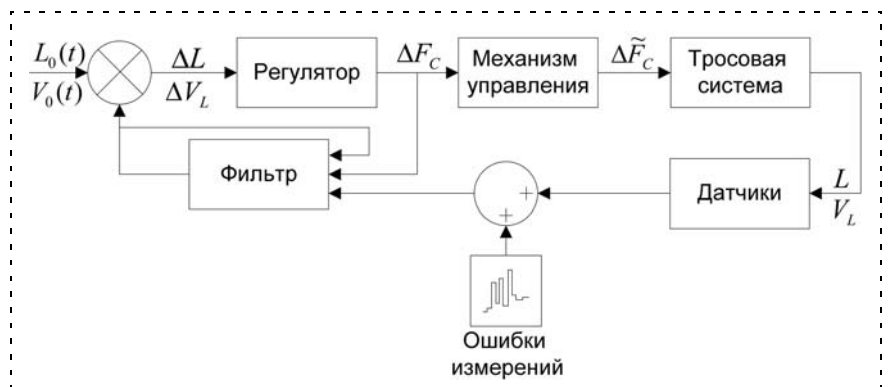


Рис. 1. Схема системы управления

трической системе координат и учитывающей все особенности объекта управления.

Математическую модель объекта управления (тросовой системы) вместе с системой управления можно представить в следующей общей форме:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, u); \quad (1)$$

$$u(t) = u^0(t) + K^T(t)[\tilde{z} - z^0(t)]; \quad (2)$$

$$z = f(x) + w(t); \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = \Phi(y, u) + P(t)(z - \tilde{z}); \quad (4)$$

$$\tilde{z} = \varphi(y), \quad (5)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ и $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ — векторы переменных состояния объекта управления и фильтра; t — время; $u(t)$ — скалярное управление; $z = (z_1, z_2, \dots, z_k)^T$ — вектор измеряемых параметров; $\tilde{z}$ — сглаженный вектор измеряемых параметров; $F(x, u)$, $\Phi(y, u)$, $f(x)$, $\varphi(y)$ — известные вектор-функции; $u^0(t)$, $z^0(t)$ — номинальные зависимости для управления и измеряемых параметров; $w(t)$ — случайный процесс, определяющий возникающие ошибки измерений; $K(t)$ — вектор-функция параметров регулятора; $P(t)$ — матрица параметров фильтра.

В качестве управления при разворачивании ТС обычно рассматривается сила, возникающая в механизме разматывания троса, расположенном на КА. Решается задача расчета оптимальных зависимостей для компонент вектора-функции $K(t)$ и матрицы $P(t)$ в силу задаваемых ниже критериев оптимальности.

Классические методы синтеза алгоритмов управления и оценивания

При применении классических методов расчета регуляторов и динамических фильтров используются линеаризованные математические модели

объекта управления [2, 5]. В этом случае совокупность уравнений (1)–(5) принимает вид

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{B}(t)\mathbf{x} + \mathbf{m}(t)u; \quad (6)$$

$$u(t) = \mathbf{K}^T(t)\tilde{\mathbf{z}}; \quad (7)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}(t)\mathbf{x} + \mathbf{w}(t); \quad (8)$$

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \mathbf{B}(t)\mathbf{y} + \mathbf{m}(t)u + \mathbf{P}(t)(\mathbf{z} - \tilde{\mathbf{z}}); \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{C}(t)\mathbf{y}, \quad (10)$$

где зависимости $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{m}(t)$ определяются применяемой номинальной программой развертывания тросовой системы. Здесь векторы состояний объекта управления $\mathbf{x}$, фильтра $\mathbf{y}$ и измеряемых параметров $\mathbf{z}$, а также функция управления u представляют собой отклонения от своих номинальных значений.

Пусть ошибки измерений, характеризуемые функцией $\mathbf{w}(t)$, представляют собой гауссов векторный белый шум с параметрами

$$M[\mathbf{w}(t)] = 0, M[\mathbf{w}(t)\mathbf{w}^T(t)] = \mathbf{Q}(t)\delta(t - \tau), \quad (11)$$

где $\mathbf{Q}(t)$ — симметричная положительно определенная матрица интенсивности вектора $\mathbf{w}(t)$; $\delta(t - \tau)$ — дельта-функция.

Тогда при заданных квадратичных критериях оптимальности [2, 5]

$$J = \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{x}^T \mathbf{a} \mathbf{x} + c u^2) dt; \quad (12)$$

$$J_f(t) = M\{[\mathbf{y}(t) - \mathbf{x}(t)]^T [\mathbf{y}(t) - \mathbf{x}(t)]\}, \quad (13)$$

где $\mathbf{a}$ — положительно определенная симметричная матрица, $c > 0$, поставленные задачи имеют известные решения, причем сначала решается задача расчета оптимального регулятора в силу критерия (12) при отсутствии шума $\mathbf{w}(t) = 0$, а потом — задача расчета оптимального линейного фильтра в соответствии с критерием (13).

Функции $\mathbf{K}(t)$ и $\mathbf{P}(t)$ определяются следующими выражениями [2, 5]:

$$\mathbf{K}(t) = -\frac{1}{c} [\mathbf{A}(t)\mathbf{m}(t)]; \quad (14)$$

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{C}^T(t)\mathbf{Q}^{-1}(t). \quad (15)$$

Здесь матричные функции $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{R}(t)$ удовлетворяют системам обыкновенных дифференциальных уравнений вида [1, 4]

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = -\mathbf{a} - \mathbf{A}\mathbf{B} - \mathbf{B}^T\mathbf{A} + \frac{1}{c} (\mathbf{A}\mathbf{m}\mathbf{m}^T\mathbf{A}); \quad (16)$$

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{R} + \mathbf{R}\mathbf{B}^T - \mathbf{R}\mathbf{C}^T\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{R}, \quad (17)$$

где $\mathbf{R}(t_0)$ — известная начальная ковариационная матрица вектора состояния $\mathbf{x}$. Граничное условие для функции $\mathbf{A}(t)$ зададим в конечной точке в виде $\mathbf{A}(t_k) = 0$ и определим обратным интегрированием системы (16) до момента времени t_0 [5].

Для решения задач синтеза параметров регулятора и фильтра обычно используются достаточно простые уравнения движения ТС. Воспользуемся для этого уравнениями плоского движения ТС в подвижной орбитальной системе координат [3]:

$$L'' - L(\theta')^2 - 2\theta'L - 3L\cos^2\theta = -\frac{F_u}{m_1\Omega^2},$$

$$\theta'' + 2\frac{L'}{L}(\theta' + 1) + \frac{3}{2}\sin 2\theta = 0, \quad (18)$$

где L — длина троса; θ — угол отклонения троса от местной вертикали; F_u — сила в механизме управления выпуском троса; m_1 — масса концевой груза.

Уравнения (18) записаны для круговой орбиты базового КА и для безразмерного времени $\tau = \Omega t$, где Ω — угловая скорость движения КА по орбите. Функцией управления в системе (18) является величина $u = -F_u/m_1\Omega^2$.

Уравнения движения (18) составлены при следующих допущениях:

- 1) масса КА много больше массы груза;
- 2) трос представляет собой невесомую и нерастяжимую связь;
- 3) расстояние до геометрического центра Земли много больше размеров ТС;
- 4) механизм выпуска троса безынерционен;
- 5) гравитационное поле считается центральным и сферическим.

Записывая систему (18) как систему четырех дифференциальных уравнений первого порядка и проводя стандартную операцию линеаризации, нетрудно получить линейную модель движения в форме (6), где

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ B_{21} & 0 & B_{23} & B_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{pmatrix}, \mathbf{m} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Здесь $B_{21} = \omega_\theta^2 + 2\omega_\theta + 3\cos^2\theta$, $B_{23} = -3L\sin 2\theta$,

$B_{24} = 2L(\omega_\theta + 1)$, $B_{41} = 2\frac{V_L}{L^2}(\omega_\theta + 1)$, $B_{42} = -\frac{2}{L}(\omega_\theta + 1)$,

$B_{43} = -3\cos 2\theta$, $B_{44} = -2\frac{V_L}{L}$, $V_L = L'$, $\omega_\theta = \theta'$.

Пример синтеза алгоритмов управления и оценивания

В качестве примера рассматривается программное развертывание ТС для спуска малой капсулы с полезным грузом в заданный район земной по-

верхности [1]. Развертывание состоит из двух этапов: этап медленного развертывания в вертикальное положение на длину троса 3 км и этап быстрого развертывания при конечной длине троса около 30 км.

На первом этапе программное развертывание ТС можно описать следующей динамической зависимостью [3]:

$$F_u^0 = aL + bV_L - d, \quad (20)$$

где $a = 4,6$; $b = 3,5$; $d = 4800$. Длительность этапа составляет около 6000 секунд.

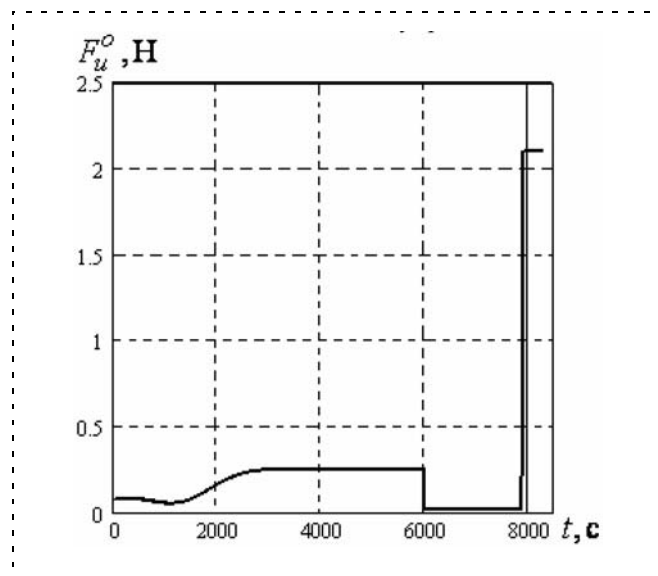


Рис. 2. Программное развертывание космической тросовой системы

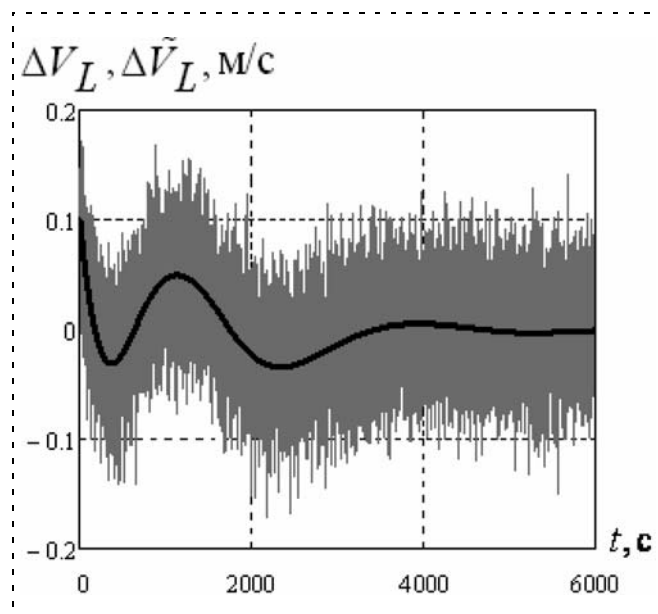


Рис. 3. Динамическая линейная фильтрация измерений скорости развертывания троса при использовании линейной модели объекта управления

На втором этапе программное развертывание описывается релейным законом управления [6]

$$\begin{aligned} F_u^0 &= F_{\min}, \text{ если } t \leq t_n; \\ F_u^0 &= F_{\max}, \text{ если } t > t_n, \end{aligned} \quad (21)$$

где $F_{\min}$, $F_{\max}$, t_n — параметры закона; t_n — время переключения. Выбором значений параметров закона можно обеспечить заданные конечные значения характеристик движения капсулы. В данной работе использовались следующие значения: $F_{\min} = 0,02$ Н; $F_{\max} = 2,1$ Н; $t_n = 7900$ с, что соответствует $\theta'_k = L'_k = 0$, $\theta_k = -58^\circ$, $L_k = 32\,700$ м. Длительность всего процесса развертывания составляет около 8280 секунд. На рис. 2 показана функция $F_u^0(t)$, принятая в данной статье за программное управление. Приведенное программное управление близко к программе, использованной в реальном тросовом эксперименте YES2 [1] в сентябре 2007 г., однако данная программа описывается приближенными аналитическими зависимостями (20)—(21).

Выражения (14)—(17) позволяют рассчитать коэффициенты обратной связи регулятора $\mathbf{K}(t)$ и фильтра $\mathbf{P}(t)$ для заданного программного развертывания (20)—(21), причем линейный динамический фильтр, как показали результаты математического моделирования, работает практически идеально с использованием линеаризованной модели движения объекта управления (6), (19). На рис. 3 в качестве примера показаны зависимости от времени исходной ΔV_L (с учетом ошибок измерений) и отфильтрованной $\Delta \tilde{V}_L$ (сплошная линия) функций, характеризующих отклонения от программных значений скорости развертывания троса на первом этапе развертывания. При построении зависимостей матрица интенсивности шума $\mathbf{Q}(t)$ была взята диагональной со стандартными отклонениями $\sigma_L = 0,04$ м и $\sigma_V = 0,04$ м/с по длине и скорости выпуска троса соответственно. Аналогичные результаты получаются и при фильтрации ошибок по длине троса.

Учет нелинейности при синтезе алгоритмов управления и оценивания

Для проверки работы полученного линейного фильтра на нелинейной модели объекта управления были использованы уравнения движения ТС в неподвижной геоцентрической системе координат. При построении уравнений движения учитываются гравитационные силы и сила упругости троса (аэродинамическими силами пренебрегается). Поэтому уравнения движения центров масс КА и капсулы примут вид

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{V}_i, \quad m_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = \mathbf{G}_i + \mathbf{F}_i, \quad (22)$$

где $i = 1, 2$ (индексы 1 и 2 соответствуют капсуле и КА); $\mathbf{r}_i, \mathbf{V}_i$ — радиусы вектора и скорости тел; m_i — массы тел; $\mathbf{G}_i = -K\mathbf{r}_i/r_i^3$ — гравитационные силы в центральном поле Земли; $\mathbf{F}_2 = F(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)/|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$ и $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2$ — силы упругости, действующие на капсулу и КА; F — модуль силы упругости троса.

Поскольку трос не работает на сжатие, модуль силы упругости вычисляется по закону Гука из выражения

$$F = \begin{cases} c(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - L)/L, & \text{если } |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - L \geq 0; \\ 0, & \text{если } |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| - L < 0, \end{cases} \quad (23)$$

где L — нерастянутая длина выпущенного из механизма управления троса; $c = ES$ — коэффициент упругости; E — модуль Юнга; $S = \pi D^2/4$ — площадь поперечного сечения троса; D — диаметр троса.

К этим уравнениям необходимо присоединить уравнения движения управляющего механизма, которые запишем в следующем виде:

$$\frac{dL}{dt} = V_L, \quad m_k \frac{dV_L}{dt} = F - F_u, \quad (24)$$

где m_k — коэффициент, характеризующий инерционность механизма разматывания (в данной работе этот коэффициент принимается постоянным); $F_u = -um_1\Omega^2$ — сила в механизме разматывания троса.

Уравнения (22)—(24) по сравнению с уравнениями движения (18) учитывают растяжимость троса, односторонность механической связи, инерционность механизма управления, позволяют моделировать ситуации с провисанием троса и рассчитывать изменение параметров любой исходной орбиты КА. Кроме того, при соответствующем усложнении математической модели работы механизма управления можно учесть и другие особенности его работы (дискретность управления, изменение инерционности и т. д.).

Численный эксперимент, моделирующий работу рассчитанного динамического линейного фильтра на нелинейной модели объекта управления (22)—(24), показывает появление систематических ошибок фильтрации как по скорости развертывания, так и по длине троса. Особенно это проявляется по длине троса (рис. 4).

В связи с этим был предложен нелинейный динамический фильтр, позволяющий существенно улучшить процесс фильтрации.

Структура нелинейного фильтра должна быть достаточно простой, так как интегрирование уравнений фильтра должно выполняться при работе системы управления в реальном времени. Поэтому в данной статье в качестве фильтра предлагается использовать непосредственно нелинейную модель плоского движения (18), дополненную слагаемыми

с обратной связью. Уравнения фильтра записываются в следующем размерном виде:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_\theta; \quad (25)$$

$$\frac{d\omega_\theta}{dt} = -\frac{2}{L} V_L(\omega_\theta + \Omega) - \frac{3}{2} \Omega^2 \sin(2\theta); \quad (26)$$

$$\frac{dL}{dt} = V_L + P_{31}(L - \tilde{L}) + P_{32}(V_L - \tilde{V}_L); \quad (27)$$

$$\frac{dV_L}{dt} = L[(\omega_\theta + \Omega)^2 - \Omega^2(1 - 3\cos^2\theta)] - \frac{F_u}{m_1} + P_{41}(L - \tilde{L}) + P_{42}(V_L - \tilde{V}_L). \quad (28)$$

Матрица коэффициентов обратной связи фильтра $\mathbf{P}$, входящая в уравнения фильтра (8), была упрощена, так как учитывались лишь ошибки по скорости развертывания и длине троса.

Критерий оптимальности при расчете нелинейного фильтра, характеризующий ошибки фильтрации, зададим в виде

$$J_f = M \left\{ \int_0^T \|\mathbf{P}(\mathbf{z} - \tilde{\mathbf{z}})\|^2 dt \right\}, \quad (29)$$

где $\mathbf{z} - \tilde{\mathbf{z}} = (\Delta\tilde{L}, \Delta\tilde{V})^T$, $\Delta\tilde{L} = L - \tilde{L}$, $\Delta\tilde{V} = V - \tilde{V}$; L и V — измеренные значения длины и скорости троса; $\tilde{L}$ и $\tilde{V}$ — длина и скорость троса на выходе из фильтра; $\|\mathbf{P}(\mathbf{z} - \tilde{\mathbf{z}})\|$ — евклидова норма.

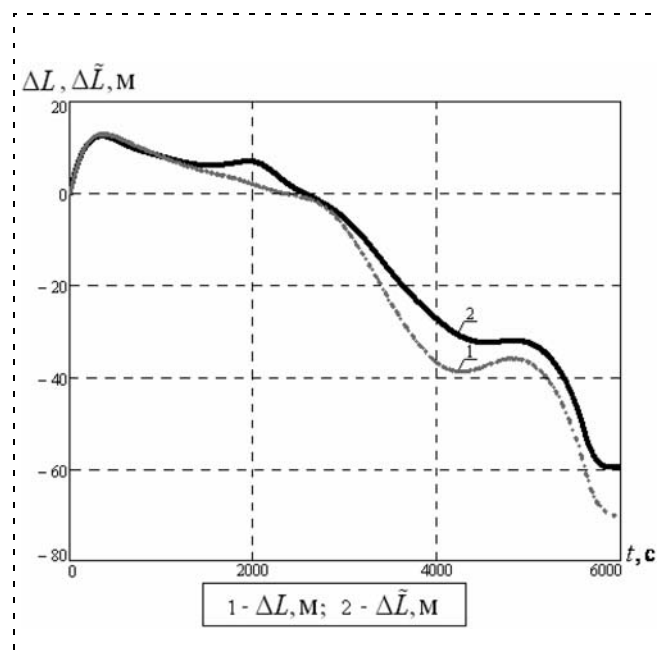


Рис. 4. Динамическая линейная фильтрация измерений длины развернутого троса при использовании нелинейной модели объекта управления

Критерий (29) отличается от критериев, используемых в задачах оптимальной фильтрации [2], так как он не зависит от времени: операция математического ожидания берется от интеграла, взятого по всему интервалу движения системы. Кроме того, критерий зависит от матрицы $\mathbf{P}$ (коэффициентов обратной связи фильтра), которая ищется в классе постоянных матриц. Для минимизации критерия предлагается использовать прямые методы нелинейного программирования. Несомненно, решение данной задачи по нелинейным моделям ТС и фильтра — чрезвычайно громоздкая процедура, так как на каждом шаге минимизации необходимо оценивать математическое ожидание интеграла, например, методом статистических испытаний. Однако можно поступить иначе, решая задачу минимизации критерия (29), например, для одной реализации случайного процесса $\mathbf{w}(t)$. Если значения критерия (29) мало зависят от конкретной реализации случайного процесса, то такой подход может оказаться существенно менее трудоемким.

Пример синтеза алгоритмов управления и оценивания с учетом нелинейности

Для расчета матрицы коэффициентов обратной связи фильтра $\mathbf{P}$ использовали математический пакет MATLAB с расширением Simulink. Критерий (29) минимизировали стандартными средствами пакета MATLAB с помощью метода Нелдера-Мида по одной реализации случайного процесса (ошибок измерений). Результаты минимизации на первом этапе разворачивания ТС: $P_{31} = 0,1188$; $P_{32} = -0,1669$; $P_{41} = -0,0068$; $P_{42} = 0,5744$; $J_f = 1396,8$. Начальное

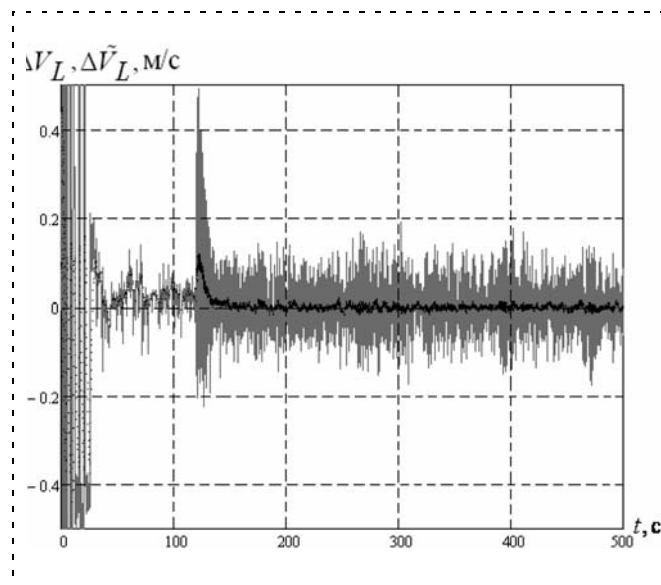


Рис. 5. Динамическая нелинейная фильтрация измерений скорости разворачивания троса при использовании нелинейной модели объекта управления

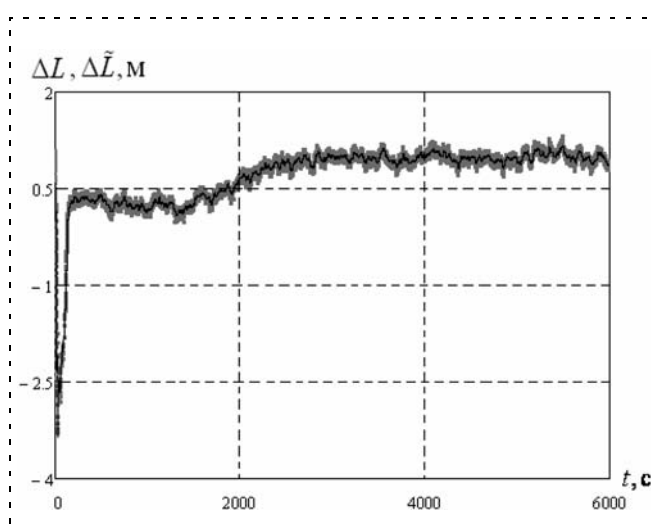


Рис. 6. Динамическая нелинейная фильтрация измерений длины развернутого троса при использовании нелинейной модели объекта управления

значение критерия оптимальности равно $J_f = 21006,0$ при единичных коэффициентах обратной связи фильтра. Как показали исследования, полученное решение практически не изменялось при использовании других реализаций случайного процесса для ошибок измерений. Процесс фильтрации измерений скорости и длины троса при оптимальных коэффициентах обратной связи $\mathbf{P}$ иллюстрируют рис. 5 и 6. Систематическая ошибка по длине троса исчезает, изменяется также характер переходных процессов при работе системы управления. Было установлено также, что процесс фильтрации мало изменяется для различных сочетаний начальных ошибок отделения капсулы от КА.

Проведенные результаты моделирования показывают, что нелинейные динамические фильтры, построенные на основе упрощенных моделей движения ТС, в сочетании с прямыми методами оптимизации параметров динамической фильтрации достаточно эффективны и могут быть использованы при проектировании систем управления движением космических тросовых систем.

Список литературы

1. Kruijff M., Heide E., Stelzer M., Ockels W., Gill E. First Mission Results of the YES2 Tethered SpaceMail Experiment // AIAA. 2008. 7385.
2. Дмитриевский А. А., Иванов Н. М., Лысенко Л. Н., Богодистов С. С. Баллистика и навигация ракет. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.
3. Белецкий В. В., Левин Е. М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 336 с.
4. Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы). М.: Наука, 1974. 696 с.
5. Летов А. М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969. 360 с.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
devyatis@iacp.dvo.ru,

К. А. Числов, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
Институт автоматизации и процессов управления
ДВО РАН, Владивосток

Методы построения устойчивых двухкомпонентных инерциальных навигационных систем на основе интерпретации радиальной позиционной информации

Дана интерпретация информации о радиус-векторе места объекта, позволяющая построить асимптотически устойчивые алгоритмы коррекции двухкомпонентных систем инерциальной навигации. Приведены результаты численных исследований.

Ключевые слова: инерциальная навигация, гироскоп, ньютонометр, высотная коррекция, обратная задача

Введение

При обращении к истории инерциальной навигации можно заметить, что первыми в их современном понимании инерциальными навигационными системами (ИНС/INS), получившими наиболее широкое распространение, стали двухкоординатные (2D), или двухкомпонентные — по числу функциональных ньютонометров (акселерометров) — системы (2D-ИНС) [1, 2].

Основная причина обращения к 2D-схемам ИНС, прежде всего, состояла в желании избавиться от той неустойчивости динамической группы уравнений (ДГУ), описывающих функционирование ИНС, которая исходно характерна для 3D-схем [2]. Это достаточно просто достигалось путем отказа от полной автономности ИНС за счет привлечения так называемой высотной информации (а, по сути, радиальной информации о модуле радиус-вектора) о текущем месте объекта в процессе формирования модели напряженности гравитационного поля Земли (GE-поля) в составе математической модели траектории движения объекта (а это и есть ДГУ ИНС). Одновременно с этим знание одной из сферических координат объекта (модуля радиус-вектора, далее — радиуса) делало лишней часть уравнений, описывающих ее эволюцию, и позволяло сохранять в динамической части модели (т. е. в ДГУ) только четыре уравнения, которые гарантированно обладают свойством устойчивости, хотя и неасимптотической, по крайней мере, в тех случаях, когда их коэффициенты постоянны (например, при движении объекта вдоль географических параллелей с постоянной относительно Земли линейной скоростью). Этим, собственно, и исчерпывалось реше-

ние задачи коррекции ИНС по измеренным значениям радиуса. Вместе с тем, следует обратить внимание, что постановка и решение задачи коррекции при таком виде информации для 3D-ИНС приводят к асимптотически устойчивым алгоритмам системы, если, конечно, говорить о той ее части, которая описывается ДГУ [3]. В связи с этим вполне актуальна постановка проблемы наследования указанного свойства асимптотической устойчивости и 2D-системами. То, как поставленная проблема может быть решена, частично описано в работах [4, 5]. В данной статье дается более полное представление о проблеме и способах ее решения.

Основные модельные представления и результаты

Из изложенного выше видно, что для описания исходной идеализированной модели обратной, по сути, задачи, решаемой корректируемой 3D-ИНС (далее — модели 3D-ИНС), достаточно ограничиться ДГУ и моделью измерения радиуса места подвижного объекта. Тогда в самом общем виде модель 3D-ИНС будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k q_j + p_i, \quad q_i(0) = q_{i,0}, \\ \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k p_j + G_i(\mathbf{q}, |\mathbf{q}|) + F_i, \quad p_i(0) = p_{i,0}, \\ \mathbf{z} &= |\mathbf{q}|, \quad (i, j, k) = \overline{1, 3},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{q} = (q_i)$, $i = \overline{1, 3}$, — радиус-вектор места объекта; $\mathbf{p} = (p_i)$, $i = \overline{1, 3}$, — удельный импульс, или абсолютная линейная скорость объекта; $\mathbf{G} = (G_i)$, $i = \overline{1, 3}$, — напряженность GE-поля; $\mathbf{F} = (F_i)$, $i = \overline{1, 3}$, — равнодействующая удельных сил негравитационной природы — это переменные, которые записываются в проекциях на оси вращающейся с абсолютной угловой скоростью $\boldsymbol{\omega} = (\omega_i)$, $i = \overline{1, 3}$, правой ортогональной системы отсчета $0\mathbf{q} = 0q_1q_2q_3$ с началом в центре масс Земли и осями (принимаем) $0q_1, 0q_2, 0q_3$, направленными, соответственно, на географические Восток, Север и по радиус-вектору местоположения объекта; e_{ikj} — псевдотензор Леви-Чивита; $z = |\mathbf{q}| = r$ — измеренное (например, с помощью навигационной спутниковой системы (НСС/NSS) типа ГЛОНАСС) значение радиуса места объекта; инерциальные измерения (значений компонент $\boldsymbol{\omega}$ и $\mathbf{F}$) выполняются на борту объекта в приборной системе отсчета, физически моделирующей ориентацию системы $0\mathbf{q}$, т. е. имеющей оси, в идеале параллельные соответствующим осям последней.

В результате обработки измерений при переходе к 2D-ИНС в модели движения объекта (т. е. ДГУ) остаются только четыре уравнения (т. е. в (1) $i = \overline{1, 2}$), в которых $q_3 = r$, $p_3 = \dot{r} - \omega_2 q_1 + \omega_1 q_2$, $G_i = G(\mathbf{x}, r)$, $\mathbf{x} = (q_i)$, $i = \overline{1, 2}$. Эти уравнения при функциони-

ровании 2D-ИНС интегрируются в условиях присутствия погрешностей в измерениях ω_i ($i = \overline{1, 3}$), F_i ($i = \overline{1, 2}$), r , оценке $\dot{r}$ и начальных состояниях q_i , p_i ($i = \overline{1, 2}$), которые, в свою очередь, порождают погрешности δq_i и δp_i ($i = \overline{1, 2}$) решения навигационной задачи в линейном приближении, описываемые следующими уравнениями (ДГУ "в малом"):

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta q_j + \delta p_i - e_{ikj}v_k q_j, \delta q_i(0) = \delta q_{i,0}, \\ \delta \dot{p}_i &= \left(\frac{\partial G_i(\mathbf{x}, r)}{\partial q_i} \right) \delta q_i - e_{ikj}\omega_k \delta p_j + \left(\frac{\partial G_i(\mathbf{x}, r)}{\partial r} \right) \varepsilon_r - \\ &\quad - e_{ikj}v_k p_j + f_i + g_i, \delta p_i(0) = \delta p_{i,0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i = \overline{1, 2}$; $j, k = \overline{1, 3}$; $\mathbf{v} = (v_k)$, $\mathbf{f} = (f_i)$ — инструментальные погрешности гироскопов и ньютонометров; ε_r — погрешность измерения r ; $\delta p_3 = \varepsilon_3 - \omega_2 \delta q_3 + \omega_1 \delta q_2$; ε_3 — погрешность оценки $\dot{r}$ по r ; $\mathbf{g} = (g_i)$ — неучтенная в (1) аномалия напряженности GE-поля; $q_1 = q_2 = 0$, $q_3 = r$, $p_1 = \omega_2 r$, $p_2 = -\omega_1 r$, $p_3 = \dot{r}$.

Теперь уместно заметить следующее. В силу того, что в 3D-ИНС доступны все три модельные значения компонент вектора $\mathbf{q}$ (т. е. q_1^* , q_2^* и q_3^*), возможно построение линейной невязки измерений, т. е. $\delta z = |\mathbf{q}| - |\mathbf{q}^*| = \delta q_3 + \varepsilon_r$, и постановка математически корректной (по Ж. Адамару) обратной задачи "в малом" вида "состояние-измерение", калмановский алгоритм динамического обращения которой асимптотически устойчив [3]. В случае 2D-схемы доступны только две модельные компоненты вектора $\mathbf{q}$ (т. е. q_1^* и q_2^*), вследствие чего построение линейной невязки измерения, подобной той, что имела место в случае 3D-ИНС, невозможно. Следовательно, невозможна постановка в том же виде (представляемом уравнениями (2) и невязкой $\delta z = \delta q_3 + \varepsilon_r$) и обратной задачи "в малом".

В качестве отправной точки дальнейших построений, доказывающих возможность постановок обратных задач "в малом" вида "состояние-измерение" с уравнениями (2) в качестве уравнений состояния, обратимся к движению объекта по сфере известного радиуса с центром в начале системы отсчета $0\mathbf{q}$. Напомним, что в статье рассматривается исключительно ситуация, когда физически измеряется только значение r радиуса места объекта.

При движении по сфере очевидны равенства $p_3 = 0$ и $\dot{p}_3 = 0$, которые с учетом уравнений ДГУ в (1) можно представить в виде следующих условий такого движения:

$$\dot{q}_3 - \omega_2 q_1 + \omega_1 q_2 = 0; \quad (3)$$

$$\omega_2 p_1 - \omega_1 p_2 + G_3 + F_3 = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_3 - (\dot{\omega}_2 + \omega_1 \omega_3) q_1 - (\dot{\omega}_1 - \omega_2 \omega_3) q_2 + \\ + \omega_1 p_2 - \omega_2 p_1 + (\omega_1^2 + \omega_2^2) q_3 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где (5) — результат дифференцирования (3). Для $\ddot{q}_3$ можно получить два других уравнения путем суммирования и вычитания (4) и (5):

$$\begin{aligned} \ddot{q}_3 - (\dot{\omega}_2 + \omega_1 \omega_3) q_1 - (\dot{\omega}_1 - \omega_2 \omega_3) q_2 + \\ + G_3 + F_3 + (\omega_1^2 + \omega_2^2) q_3 = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_3 + (\dot{\omega}_2 + \omega_1 \omega_3) q_1 - (\dot{\omega}_1 - \omega_2 \omega_3) q_2 + 2\omega_2 p_1 - \\ - 2\omega_1 p_2 + G_3 + F_3 - (\omega_1^2 + \omega_2^2) q_3 = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что (7) — это формальная запись реализации на оси $0q_3$ принципа Д'Аламбера.

Заметим также, что при движении по сфере условия (3)—(7) эквивалентны условиям $\dot{q}_3 = 0$, $\ddot{q}_3 = 0$,

$F_3 = -G_3 - (\omega_1^2 + \omega_2^2)r$, а при движении по произвольной поверхности условия (3)—(6), вообще говоря, нарушаются, но условие (7) — принцип Д'Аламбера — остается в силе. Иное имеет место при интегрировании ДГУ 2D-ИНС, выполняемом, как отмечалось выше, в условиях присутствия погрешностей в измерениях и оценках начальных состояний. В этом случае вне зависимости от того, движется ли объект по сфере или не по ней, нарушаются все условия (3)—(7). Такие нарушения можно интерпретировать как невязки измерений при постановке обратных задач "в малом" (по сути — задач коррекции 2D-ИНС) с уравнениями состояния (2) при $i = \overline{1, 2}$.

Из пяти условий (3)—(7) наиболее приемлемы для реализации в задачах коррекции условия (3) и (4), так как они не содержат вторых производных q_3 и производных угловой скорости вращения системы отсчета, что при построении невязок освобождает от нахождения оценок этих производных и что в общем случае требуется при обращении к условиям (5)—(7) (заметим, что случай обращения к (7) как наиболее характерному из этих трех условий достаточно подробно исследован в [5]). Поэтому остановимся на невязках (3) и (4). Они представляются следующим образом:

$$\delta z = \varepsilon_3 - \omega_2 \delta q_1 + \omega_1 \delta q_2; \quad (8)$$

$$\delta z = \omega_2 \delta p_1 - \omega_1 \delta p_2 + g_3 + f_3, \quad (9)$$

где f_3 представляет собой либо инструментальную погрешность дополнительного (к схеме 2D-ИНС) ньютонометра при таком (только для формирования невязки) нетрадиционном (в сравнении со схемой 3D-ИНС) его использовании, либо величину $(\omega_1^2 + \omega_2^2)\varepsilon_r$ в том случае, когда в качестве модельного (F_3^*) значения F_3 берется значение $F_3^* = -G_3^* - (\omega_1^2 + \omega_2^2)r$; G_3^* — компонента модельного ($\mathbf{G}^*$) вектора напряженности GE-поля, так что $G_3^* =$

$= G_3 - g_3$, где g_3 — компонента вектора гравитационной аномалии $\mathbf{g} = \mathbf{G}^* - \mathbf{G}$, не учитываемой в алгоритме ИНС при моделировании напряженности GE-поля.

С учетом изложенного целесообразно обратиться к постановкам только трех обратных задач, решение которых может быть отождествлено с решением задачи коррекции 2D-ИНС. Модель первой представляется уравнениями (2) и (8), второй — уравнениями (2) и (9), третьей — уравнениями (2), (8), (9), причем по отношению к последней первые две из них можно рассматривать в качестве базовых. Здесь следует заметить, что задача (2), (9) уже обсуждалась в работе [4], в которой в рамках проблем скалярной гравиметрии на базе 2D-ИНС обоснована асимптотическая устойчивость алгоритма динамического обращения и приведены результаты вычислительного эксперимента, иллюстрирующие эффективность оценки вектора $(\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2, g_3)^T$. Поэтому далее внимание целесообразно уделить задаче (2), (8), начав с проверки калмановского условия наблюдаемости [6] как необходимого условия разрешимости задачи при конечной точности вычислений и измерений.

Проверка этого условия (а она проводилась для случая движения объекта вдоль географических параллелей) указывает на принципиальную невозможность наблюдения компонент напряженности GE-поля g_1 и g_2 (и, очевидно, g_3), что исключает возможность какой-либо интерпретации задачи (2), (8) как гравиметрической; вместе с тем, как показывает эта же проверка, имеет место наблюдаемость вектора $(\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2)^T$ (кроме нескольких частных случаев движения, из которых наиболее существенным для практики является движение вдоль экватора), что сохраняет актуальность задачи как навигационной в случае достаточно высокой степени представлений о модели GE-поля.

Возвращаясь теперь к задаче (2), (8), (9), отметим, что ее интерпретация как задачи скалярной гравиметрии вполне допустима в силу доступности наблюдению (что показывает анализ наблюдаемости), как и в задаче (2), (9) [4], вектора $(\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2, g_3)^T$.

Вычислительные эксперименты

Предметом численного исследования (недостающего в уже сложившемся ряду исследований [4, 5]) является задача (2), (8). Цель численных экспериментов — оценка обусловленности обратной задачи и верификация ее реальной разрешимости в условиях конечной точности вычислений; иллюстрация сходимости (асимптотической устойчивости) алгоритма динамического обращения; оценка погрешностей решения задачи в условиях конечной точности измерений.

Результаты численного моделирования приводятся для случая движения объекта в восточном направлении со скоростью относительно Земли

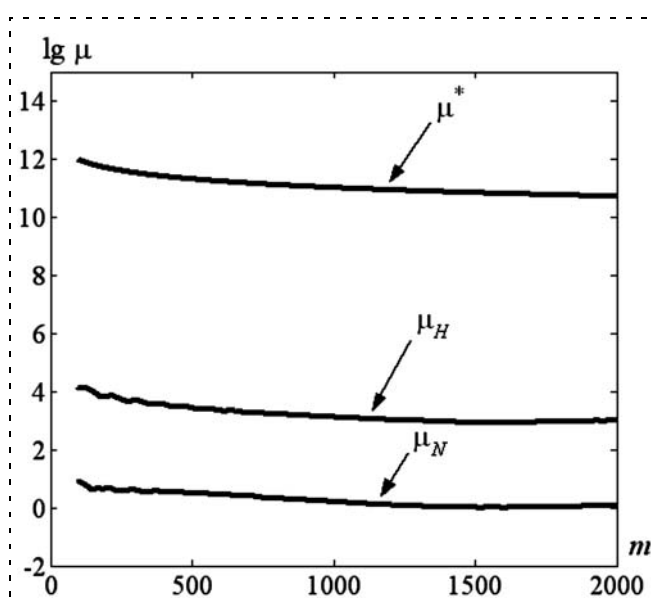


Рис. 1. Значения чисел обусловленности μ_H , μ_N , μ^*

$V = 100$ м/с вдоль географической параллели на широте $\varphi = 45^\circ$.

На рис. 1 представлены графики эволюции трех значений (μ_H , μ_N , μ^*) числа обусловленности задачи метода наименьших квадратов с декларативной моделью вида $\mathbf{J} = \mathbf{H}\mathbf{x}$, где $\mathbf{J} = (\delta z(t_i))_{i=1}^m$, m — текущее значение числа измерений, $t_i = t_0 + (i-1)\Delta t$ — i -й момент времени измерений; $\Delta t = \text{const}$ — шаг измерений (в эксперименте $\Delta t = 1$ с); $\mathbf{x} = (\delta q_1, \delta p_1, \delta q_2, \delta p_2)^T$ — вектор состояний; $\mathbf{H}$ — $(m \times 4)$ -матрица (она может быть отождествлена с матрицей наблюдаемости), составленная из строк $H_i = h_i \Phi(t_0, t_i)$, $h_i = (\omega_2(t_i), 0, \omega_1(t_i), 0)$, $\Phi(t_0, t_i)$ — значение фундаментальной матрицы решений для соответствующей

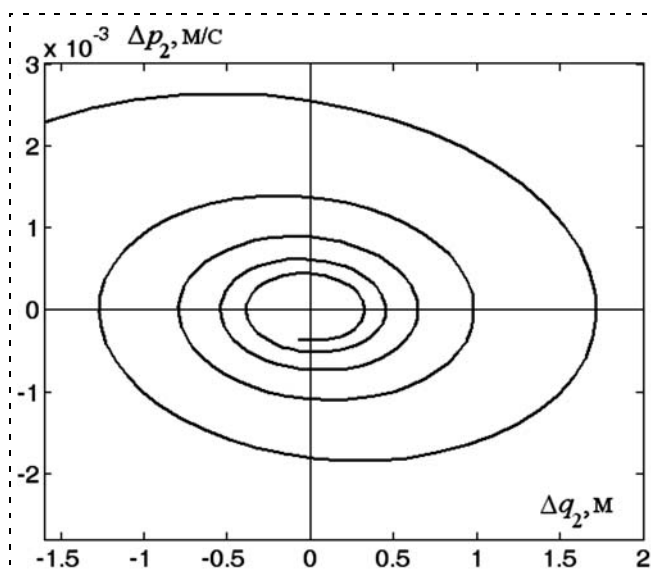


Рис. 2. Пример сходимости алгоритма динамического обращения на фазовой плоскости $(\Delta q_2, \Delta p_2)$

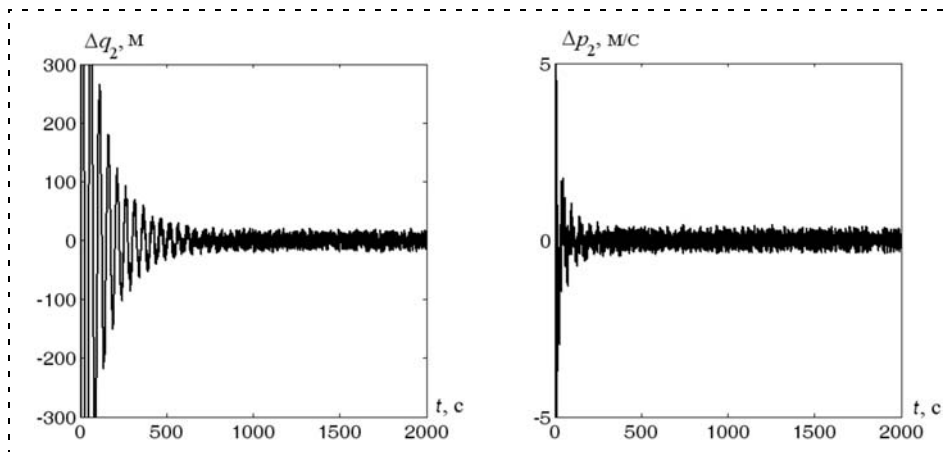


Рис. 3. Пример эволюции погрешностей (Δq_2 , Δp_2) оценивания значений δq_2 и δp_2

шего уравнению (2) однородного дифференциального уравнения; μ_H и μ_N — сингулярные числа обусловленности матрицы $\mathbf{H}$ и ее (после нормировки по столбцам) образа $\mathbf{N}$, вычисленные в машинной (компьютерной) среде с относительной точностью представления чисел $e_1 = 2,2 \cdot 10^{-16}$; $N = (H_j^c / \|H_j^c\|)_{j=1,4}$;

H_j^c и $\|H_j^c\|$ — соответственно j -й столбец матрицы $\mathbf{H}$ и его евклидова норма; $\mu^* = 1/(\sqrt{n}(2n-3)(4m+27) + 4m+30)e_1$, $n=4$, $m>n$ — критическое число обусловленности, определяющее верхнюю грань допустимых значений μ_H (и/или μ_N), начиная с которой утверждение о разрешимости обратной задачи в вычислительной среде с заданным значением e_1 теряет свою достоверность [7].

Как видно из рис. 1, утверждение о разрешимости рассматриваемой задачи вполне правомерно в силу того, что $\mu_H < \mu^*$ и $\mu_N < \mu^*$.

На рис. 2 видна сходимость к нулю на фазовой плоскости (Δq_2 , Δp_2) погрешностей оценок значений δq_2 и δp_2 (аналогичная картина имеет место и на плоскости (Δq_1 , Δp_1)) для алгоритма динамического обращения (т. е. алгоритма коррекции ИНС) калмановского типа, что является еще одним подтверждением разрешимости рассматриваемой задачи в заданной вычислительной среде (в соответствующем имитационном эксперименте погрешности измерений, как и положено делать в таких случаях, обнулялись).

На рис. 3 представлены некоторые (ограничиваемся только графиками погрешностей оценок значений δq_2 и δp_2) результаты полного имитационного численного моделирования задачи, иллюстрирующие возможности калмановского алгоритма коррекции 2D-ИНС в условиях присутствия инструментальных погрешностей в измерениях. Эти погрешности моделируются несмещенными нормальными шумами со среднеквадратическими значениями соответственно для гироскопов — $\sigma_v = 0,001$ °/ч,

для ньютонометров — $\sigma_f = 0,001$ м/с², для НСС — $\sigma_e = 1$ м и для величины $\Delta \dot{q}_3 - \sigma_3 = 0,01$ м/с.

В целом представленные результаты вычислительных экспериментов вполне убедительно иллюстрируют прикладную значимость исследованной задачи.

Заключение

В статье в рамках обоснованно ограниченной динамической группой уравнений (ДГУ) математической модели ИНС исследован случай доступности внешней (по отношению к инерциальной) информации о радиусе места объекта. Такая информация достаточна для построения асимптотически устойчивых (по ДГУ) алгоритмов коррекции 3D-ИНС [3], что достигается вполне традиционным способом, когда возможно формирование невязки непосредственно выполняемых измерений. При переходе в рассматриваемом информационном случае к схеме 2D-ИНС формирование подобной невязки становится невозможным. Вместе с тем, как показано в статье, и в такой ситуации могут быть построены модели коррекции 2D-ИНС, наследующие свойство асимптотической устойчивости корректируемых 3D-ИНС, если в качестве своего рода невязки рассматривать нарушения условий, вытекающих из условий движения объекта по сфере известного радиуса, или принципа Д'Аламбера, декларируемого на оси системы отсчета, направленной по радиус-вектору места объекта.

Список литературы

1. Броксмейер Ч. Ф. Системы инерциальной навигации. Л.: Судостроение, 1967. 278 с.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.
3. Девятисильный А. С., Числов К. А. Численное моделирование задачи коррекции трехкомпонентной инерциальной навигационной системы по высотной информации. // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. № 5. С. 101–105.
4. Девятисильный А. С., Числов К. А. Метод синтеза асимптотически устойчивой по динамической группе уравнений двухкомпонентной инерциальной навигационной системы // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2007. № 10. С. 2–4.
5. Девятисильный А. С., Числов К. А. Модель позиционно корректируемой двухкомпонентной гравиинерциальной навигационной системы на основе интерпретации принципа Д'Аламбера // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 4. С. 71–74.
6. Калман Р., Фалб П., Арbib М. Очерки по математической теории систем. — М.: Мир, 1971. 400 с.
7. Девятисильный А. С., Крыжко И. Б. Исследование обусловленности задачи численного определения квазистационарной орбиты ИСЗ по наземным наблюдениям // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 1. С. 99–101.

CONTENTS

- Aliev T. A., Musaeva N. F., Guluyev G. A., Sattarova U. E.** Noise Indication of Change of Dynamical Condition of Production Objects 2
- For monitoring the beginning of the latent period of transition of a technical slate of the object from a normal state in an emergency one and determining dynamics of its development, the technology of determining the estimations which in a normal state have values equal to zero is suggested. They form the set of informative attributes, and according to the number and value of its element distinguished from zero the dynamics and character of the arisen failure is determined.*
- Keywords:** object, noise, noisy signal, failure state, informative sign, noise indicator
- Aliev T. A., Nusratov O. Q., Karimov A. B., Mastaliyeva D. I.** Algorithm of Eliminating Phase Shift Error Arising when Applying Analog-to-Digital Converter to Multi-Dimensional Signals 5
- In the work, we analyze an impact a phase shift, formed between readings when applying analog-to-digital converter to multi-dimensional random signals, has on the accuracy of estimate of cross correlation functions' noisy signals. In order to eliminate the phase shift, we propose an algorithm and software implemented on the basis of interpolation and extrapolation procedures. We show that the error of the sought estimates is minimized. Results of numerical experiments are given.*
- Keywords:** signal, analog-to-digital converter, phase shift, correlation function, interpolation, extrapolation
- Nusratov O. Q., Jafarov P. S., Zeynalov E. R., Mustafayeva A. M., Jafarov S. M.** Analytical Method for Design of a Controller with Fuzzy Model for Control of a Flexible Joint Robot Arm as a Nonlinear Dynamical Object 10
- A method of synthesis of controllers with fuzzy TS model is suggested for control of one class of nonlinear dynamic objects. The analytical formulas are obtained for calculation of controller's parameters subject to object's parameters and the desired performance index – maximal degree of stability of control system. The outcomes of computer modeling of synthesized control system of flexible joint robot arm confirmed the efficiency of suggested method.*
- Keywords:** controller with fuzzy TS-model, fuzzy rules of control, maximal degree of stability of control system, space of conditions
- Mamedov F. I., Asadova R. S., Asadova K. F., Asad-zade S. G.** Groudwork of Measuring of the Two-Dimensional Inductive Converter Linear and Angular Movings 14
- The two-functional inductive gauge on the printed-circuit-board, intended for simultaneous and independent measurement of linear and angular movings with a wide range and the increased accuracy of measurement has developed. That the offered converter in comparison with existing, possesses wide potential functionalities with sensitivity and accuracy.*
- Keywords:** inductive converter, printed-circuit-board, two-functional inductive gauge
- Guluyev G. A., Rzayev A. H., Aliyev Y. H., Rizavnov M. H., Sattarov I. R.** Intellectual Control Station of Rocker Machine 17
- The article is devoted to development of control station of machine of rocker during mechanized oil extraction. Structure charts of station, control and security block, LCD communicator, and also structure of the menu of communicator of LCD are considered. The results of constructive execution are shown.*
- Keywords:** rod deep pumps, rocker machine, control station, communicator, microcontroller
- Aliyev E. R.** Complex Information System of Monitoring of Residential Buildings and Socially-Significant Objects . . . 21
- The structure of complex information system of technical monitoring of building sites is offered. As a key element of the systematization block of the data received from detectors, it is considered structured neural network model aggregating the monitoring data about presence distractive changes in bearing structures of building constructions.*
- Keywords:** fiber-optical sensor, structured neural network model, feedforward neural network
- Guluyev G. A., Rzaev A. H., Sattarov I. R., Yusifov I. B.** Complex Method of Measuring of Debit of the Oil Well . . . 27
- The article is devoted to development of complex method of measuring of debit of the oil including measuring of mass of the liquid in measuring tank by piezometric method and measuring of capacity by means of flow meter during the drain of the liquid from measuring tank.*
- Keywords:** debit of the oil, group measuring tank, trap, piezometric method, microcontroller
- Serebrenny V. V., Rybalchenko D. E.** Prospects of Development of a Domestic Production of Robots 31
- The analysis of the market of industrial robots in the developed countries is carried out. The information on one of the basic domestic manufacturers of robots and the robotised devices is resulted. The estimation of the basic tendencies of development of a domestic production of robots is given.*
- Keywords:** robotics, industrial robots, manufacture of robots to Russia, market analysis, AVTOVAZ

- Gaponov I. Yu., Poduraev Yu. V., Hyun-Chan Cho.** Image-Based Force Generation in Telemicrobotic Systems. 34
- Implementation of force feedback in micro-telerobotic systems leads to sufficient increase in accuracy and helps to decrease manipulation time. However, measuring forces in micro-Newton range with force sensors is a challenging issue due to numerous technical and design issues in mounting the sensors and obtaining the data from them. In this paper, an original image-based force generation algorithm is presented. Several mathematical force models of the environment are suggested and investigated experimentally. The application of the proposed method allowed to increase the quality of micro-manipulation, which proves the efficiency of the algorithm.*
- Keywords:** telerobotics, micro-manipulation, human-machine interface, force feedback
- Golovin V. F., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** The Review of Robotics State in Restorative Medicine 42
- In the article the classification of robotics in medicine is given and modern state of robotics in restorative medicine is considered. Different robotics means for extremities movements, manipulations on soft tissues and prosthetics are described. Also the developing prospects of robotics in restorative medicine are concluded.*
- Keywords:** robotics, restorative medicine, extremities movements in joints, massage, prostheses
- Zhdanov A. V.** Development Directions of Mechatronic Units of the Left Ventricle Assist Systems and Total Artificial Heart Systems of the Pulsating Type 51
- The article presents the main tendencies of modern mechatronic units of the left ventricle assist system and total artificial heart system providing a pulsating flow. The article presents classification, structural schemes of modern mechatronic unit, comparative technical specifications and future designs of this systems.*
- Keywords:** mechatronic unit, left ventricle assist system, total artificial heart system, implantable unit, development directions
- Lebedev G. N., Tran Van Tuyen, Vu Xuan Huong.** Control and Management of Traffic Safety for Oncoming Traffic. 56
- We pose the problem of simultaneous control of the security of oncoming traffic moving objects and their management through automated means. We propose a joint two-tier structure and control, is provided by the adaptive tuning regulators the necessary security to avoid obstructions.*
- Keywords:** safety control, optimum control, dynamic programming, risk function
- Zabolotnova O. Yu.** The Solution of Problems of Control and Estimation with Program Deployment of Space Tether System. 61
- The algorithms of regulation and estimation of a variable condition intended for work in structure of a control system with program deployment space tether system are analyzed. Synthesis of a regulator and the classical linear filter Kalmana intended for an estimation of states of control object in the presence of errors of measurements is carried out. Errors of measurements represent white Gaussian noise. Comparison of filter Kalmana and the offered nonlinear filter is made. The example of work of algorithms with deployment space tether system intended for re-entry of a capsule in given area to an earthy surface is resulted.*
- Keywords:** space tether system, optimal regulator, Kalman filter, nonlinear filter, mathematical model, nonlinear programming
- Devyatisil'nyi A. S., Chislov K. A.** The Methods of the Stable Two-Component Inertial Navigation Systems Construction on the Basis of Radial Positional Information Interpretation. 67
- The interpretation of the information about object position radius resulting to the opportunity to construct asymptotically stable algorithms of the two-component inertial navigation systems correction is given. The results of numerical research are presented.*
- Keywords:** inertial navigation, gyroscope, newtonometer, altitude correction, inverse problem

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 31.05.2011. Подписано в печать 18.07.11. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 10,35. Заказ 547. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02
Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15