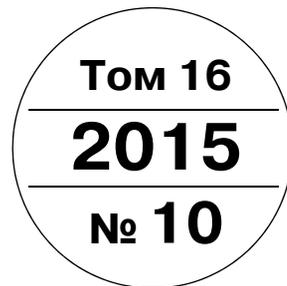


МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

- CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

- ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮШЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

- АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Миркин Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.** Синтез алгоритмов адаптивного управления для SISO-систем с запаздыванием в управлении и неизмеряемым возмущением. 651
Деменков Н. П., Мочалов И. А. Нейросетевая оценка динамики системы автоматической оптимизации. 659

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Головин В. Ф., Архипов М. В., Павловский В. Е.** Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины. 664
Богданов Д. Р., Даринцев О. В. Кинематика манипулятора с управляемым изгибом на базе твердых элементов со сферической поверхностью. 671
Страшнов Е. В., Михайлюк М. В. Моделирование ограничений на относительное движение шарнирно связанных тел в системах виртуального окружения. 678

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Алиев Т. А., Рзаев А. Г., Гулуев Г. А., Ализаде Т. А., Саттарова У. Э., Рзаева Н. Э.** Система диагностики и управления штанговых глубинно-насосных установок нефтяных скважин с использованием робастной Noise-технологии. 686
Ливаткин П. А., Положенцев К. А. Метод оценки скорости перегрева расходуемого электрода с использованием лазерного дальномера при управлении вакуумным дуговым переплавом. 699
Загашвили Ю. В., Анискевич Ю. В., Кузьмин А. М., Левихин А. А., Савченко Г. Б. Управление технологическим процессом получения синтез-газа в высокотемпературном реакторе. 704

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Шукалов А. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Костишин М. О., Нечаев В. А.** Алгоритмы формирования индикационного кадра авионики с использованием системы автоматизированного проектирования SCAD. 710
Девятисильный А. С., Числов К. А. Модель конкурентного нейроморфного комплексования информации в интегрированной спутниково-инерциальной навигационной системе. 716

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора 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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Mirkin E. L., Sharshenaliev Zh. Sh.** Adaptive Control Design for SISO Plants with Input Delays and Unmeasured Perturbations 651
Demenkov N. P., Mochalov I. A. Neural Network Estimation of the Dynamics of the Automatic Optimization System 659

ROBOTIC SYSTEMS

- Golovin V. F., Arkhipov M. V., Pavlovskiy V. E.** Specific Features of Designing of the Robotic Systems for the Restorative Medicine. 664
Bogdanov D. R., Darintsev O. V. Kinematics of a Manipulator with a Controlled Bending on the Basis of Solid Elements with a Spherical Surface. 671
Strashnov E. V., Michaylyuk M. V. Simulation of Restrictions for the Relative Motion of the Articulated Rigid Bodies in the Virtual Environment Systems 678

DIAGNOSTICS AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Aliev T. A., Rzayev A. H., Guluyev G. A., Alizada T. A., Sattarova U. E., Rzayeva N. E.** System for Oil Well SRPU Diagnostics and Control Using the Robust Noise Technology . . . 686
Livatkin P. A., Polozhentsev K. A. Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting 699
Zagashvili Yu. V., Aniskevich J. V., Kuzmin A. M., Levikhin A. A., Savchenko G. B. Control of the Technological Process of the Synthesis Gas Production in a High-Temperature Reactor 704

NAVIGATION AND CONTROL OF AERIAL VEHICLES

- Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O., Nechayev V. A.** Algorithms for Formation of Indication Pictures in Avionic Equipment with the Use of SCADE Integrated Design Environment 710
Devyatisil'nyi A. S., Chislov K. A. A Model of Competitive Neuromorphic Aggregation of Information in Integrated Satellite-Inertial Navigation System 716

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

Е. Л. Миркин, д-р техн. наук, зав. каф.,

Международный университет Кыргызстана (Кыргызстан),

Ж. Ш. Шаршеналиев, д-р техн. наук, директор,

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР (Кыргызстан)

Синтез алгоритмов адаптивного управления для SISO-систем с запаздыванием в управлении и неизмеряемым возмущением

Предлагается модификация схемы адаптивного управления SISO-системами ("один вход—один выход") с эталонной моделью, предложенной в работе [8], для случая присутствия в замкнутой системе неизмеряемых возмущений. Получены новые алгоритмы адаптивного управления в классе систем со вспомогательной моделью и расширенной ошибкой. Синтезированные алгоритмы гарантируют устойчивость замкнутой системы управления. Выполнение цели управления обеспечивается присутствием в замкнутом контуре сигнала с богатым спектром и диссипативностью системы в противном случае.

Ключевые слова: адаптивные алгоритмы управления, SISO-системы, расширенная ошибка, диссипативность

Введение

Временное запаздывание в канале управления — часто встречаемая проблема, с которой имеют дело разработчики систем. Транспортные и коммуникационные системы, химические процессы, энергетические системы — это наиболее типичные примеры, где встречаются системы с запаздыванием. Эффект запаздывания не только ограничивает возможности синтеза систем с типовыми законами управления, но и может выступать источником неустойчивости замкнутых систем. Таким образом, управление такими системами даже в детерминированных условиях вызывает определенные трудности, не говоря о случае, когда параметры системы не определены, и на систему действуют неизмеряемые возмущения.

Проблема управления системами с запаздыванием в условиях неопределенности решалась многими авторами в классе робастных [2, 3] и адаптивных систем [1, 5, 6, 11]. Большинство предлагаемых решений синтеза алгоритмов адаптивного управления такими системами базировались на использовании блоков распределенного запаздывания [4], технически сложно реализуемых. В данной работе для управления системами "один вход—один выход" (SISO, "single input—single output") с входным запаздыванием и неизмеряемым возмущением предлагается новая структура управляющего устройства с модельным упреждением, использующая схему фильтрации минимальной сложности [7—10].

Постановка задачи

Рассмотрим класс управляемых систем, динамика которых описывается линейным дифференциальным уравнением с входным запаздыванием вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_p x(t) + b_p u(t - \tau) + b_p d(t - \tau); \\ y(t) &= c_p^T x(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния; $u \in \mathbb{R}$ — управляющий вход; $y \in \mathbb{R}$ — измеряемый выход объекта; $d \in \mathbb{R}$ — неизмеримое внешнее ограниченное возмущение. Постоянная матрица A_p и векторы b_p , c_p соответствующих размеров *неизвестны*, τ — *известное* время запаздывания в канале управления. Изменяемое внешнее возмущение $d(t)$ определяется выражением

$$d(t) = \theta_d^{*T} \phi(t), \quad (2)$$

где $\theta_d^* \in \mathbb{R}^{n_d}$ — вектор *неизвестных* коэффициентов;

$\phi \in \mathbb{R}^{n_d}$ — вектор *известных ограниченных* функций времени ($\phi(t) = [\phi_1(t), \phi_2(t), \dots, \phi_{n_d}(t)]^T$). Такая форма представления неизмеримого ограниченного сигнала d может обуславливаться определением его в виде усеченных сумм тригонометрических, полиномиальных или ортонормированных рядов.

Передаточную функцию системы (1) обозначим $W_0(s)$:

$$W_0(s) = \frac{y(s)}{u(s) + d(s)} = c_p^T (sI - A_p)^{-1} b_p e^{-\tau s} = k_p \frac{B_0(s) e^{-\tau s}}{A_0(s)}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_0(s) &= s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0; \\ B_0(s) &= s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где s — оператор Лапласа; n, m — порядки полиномов ($m < n$); a_i ($i = \overline{0, n-1}$), b_j ($j = \overline{0, m-1}$) — неизвестные коэффициенты полиномов; k_p — неизвестный коэффициент усиления объекта на высоких частотах, $\text{sign}(k_p)$ считается известным.

Эталонную модель зададим в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + b_m r(t - \tau); \\ y_m(t) &= c_m^T x_m(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $x_m \in \mathbb{R}^{n_1}$ — вектор состояния модели; $r \in \mathbb{R}$ — задающее воздействие; $y_m \in \mathbb{R}$ — измеряемый выход модели. Постоянная матрица A_m и векторы b_m, c_m соответствующих размеров известны. Соответственно, передаточная функция эталонной модели $W_m(s)$ определится выражением

$$\begin{aligned} W_m(s) &= \frac{y_m(s)}{r(s)} = \\ &= c_m^T (sI - A_m)^{-1} b_m e^{-\tau s} = k_m \frac{Z(s) e^{-\tau s}}{P(s)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где k_m — коэффициент усиления модели на высоких частотах; полиномы $Z(s)$ и $P(s)$ имеют похожую на объект структуру.

Требуется найти такой закон управления $u(t)$, который обеспечит асимптотическое стремление к нулю ошибки $e(t) = y(t) - y_m(t)$ для произвольных начальных условий и произвольных ограниченных сигналов $r(t)$. Таким образом, целевое условие для системы управления приобретает следующий вид:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e(t) = y(t) - y_m(t)] = 0. \quad (7)$$

Об объекте (3) и модели (6) делаются следующие предположения:

- для получения управления $u(t)$ могут быть использованы только вход и выход объекта;
- передаточная функция объекта без учета временного запаздывания $k_p \frac{B_0(s)}{A_0(s)}$ — устойчивая и минимально-фазовая (полиномы $A_0(s)$ и $B_0(s)$ — гурвицевы);
- объект и модель являются полностью наблюдаемыми и управляемыми (пары приведенных

полиномов (B_0, A_0) и (Z, P) являются взаимно простыми);

- эксцесс полюсов передаточной функции объекта $W_0(s)$ совпадает с эксцессом полюсов передаточной функции эталонной модели $W_m(s)$:

$$n^* = \text{deg}(A_0) - \text{deg}(B_0) = \text{deg}(P) - \text{deg}(Z). \quad (8)$$

Детерминированный случай

Предположим, что все параметры системы (1) известны. Для управления устойчивым минимально-фазовым объектом с входным запаздыванием (1) воспользуемся стратегией разомкнутого управления для систем без запаздывания [7]. Будем использовать схему фильтрации минимальной сложности (суммарный порядок фильтров равен $n + m$), модифицировав ее для случая входного запаздывания.

Выбор структуры фильтра. Для этого представим передаточную функцию объекта $W_0(s)$ в виде

$$W_0(s) = \frac{k_p \frac{B_0(s)}{F(s)} e^{-\tau s}}{\frac{A_0(s)}{F(s)}} = \frac{\left(k_p + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right) e^{-\tau s}}{\Gamma(s) + \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i}}, \quad (9)$$

где $F(s)$ — произвольный устойчивый полином с действительными неравными корнями:

$$\begin{aligned} F(s) &= \prod_{i=1}^m (s + \lambda_i) = \\ &= s^m + f_{m-1}s^{m-1} + \dots + f_1s + f_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\lambda_i > 0$, $\lambda_i \neq \lambda_j$, ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, m}, j \neq i$).

Полином $\Gamma(s)$ в формуле (9) имеет следующий вид:

$$\Gamma(s) = s^{n^*} + \gamma_N s^N + \gamma_{N-1} s^{N-1} + \dots + \gamma_1 s + \gamma_0, \quad (11)$$

где $N = n^* - 1$.

Постоянные коэффициенты $\gamma_j, \alpha_i, \beta_i$ ($j = \overline{0, N}, i = \overline{1, m}$) однозначно определяются через исходные параметры объекта (3) и параметры полинома $F(s)$ (т. е. через параметры a_i ($i = \overline{0, n-1}$), b_j ($j = \overline{0, m-1}$), λ_k ($k = \overline{1, m}$)).

Представим эталонную модель в виде

$$\begin{aligned} y_m(s) &= \frac{e^{-\tau s}}{R(s)} u_r(s); \\ u_r(s) &= \frac{k_m R(s) Z(s)}{P(s)} r(s), \end{aligned} \quad (12)$$

где $R(s)$ — произвольный устойчивый полином степени n^* :

$$R(s) = s^{n^*} + \rho_N s^N + \rho_{N-1} s^{N-1} + \dots + \rho_1 s + \rho_0. \quad (13)$$

Введем произвольный устойчивый полином $L(s)$ с действительными неравными корнями вида

$$L(s) = \prod_{i=1}^N (s + \delta_i) = (s^N + l_{N-1}s^{N-1} + \dots + l_1s + l_0), \quad (1)$$

где $\delta_i > 0$, $\delta_i \neq \delta_j$, ($i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$, $j \neq i$). Разложим полином $\frac{R(s) - \Gamma(s)}{L(s)}$ на простые дроби:

$$\frac{R(s) - \Gamma(s)}{L(s)} = \eta_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{s + \delta_i}. \quad (2)$$

Очевидно, что как и в предыдущем случае, коэффициенты η_i , ($i = \overline{0, N}$) однозначно определяются через исходные параметры объекта γ_j ($j = \overline{0, N}$) и параметры полиномов $L(s)$ и $R(s)$. Для простоты дальнейшего изложения зададим полином $R(s)$ в виде

$$R(s) = \frac{1}{k_l T} (Ts + 1)L(s),$$

где $T > 0$, k_l — произвольные числа.

С учетом введенных обозначений уравнение возмущенного движения системы относительно ошибки $e = y - y_m$ примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{k_l T} (Ts + 1)e(s) = \\ & = \frac{1}{L(s)} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\beta_i}{s + \lambda_i} e^{-\tau s} [u(s) + d(s)] - \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} y(s) \right) + \\ & + \frac{1}{L(s)} (k_p e^{-\tau s} [u(s) + d(s)] - e^{-\tau s} u_r(s)) + \\ & + \left(\eta_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{s + \delta_i} \right) y(s). \end{aligned} \quad (3)$$

Определим закон управления выражением

$$\begin{aligned} u(s) = & \frac{1}{k_p} \left[\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} e^{\tau s} y_m(s) - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} u(s) - \sum_{j=1}^{n_d} \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i \theta_{dj}^*}{s + \lambda_i} \phi_j(s) \right] + \\ & + \frac{1}{k_p} \left[1 - \left(\eta_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{s + \delta_i} \right) \frac{k_l T}{(Ts + 1)} \right] u_r(s) - \sum_{j=1}^{n_d} \theta_{dj}^* \phi_j(s), \end{aligned} \quad (4)$$

где θ_{dj}^* — неизвестные коэффициенты, $\phi_j(s)$ — образы преобразования Лапласа известных ограниченных временных функций $\phi_j(t)$, ($j = 1, 2, \dots, n_d$).

Тогда с учетом (9) и (15) уравнение регулятора (17) приобретает следующую форму:

$$u(s) = \frac{1}{k_p} \frac{A_0(s)}{B_0(s)R(s)} u_r(s) - d(s). \quad (5)$$

Поскольку полиномы $A_0(s)$ и $B_0(s)$ — гурвицевы, то закон управления (17) обеспечит точное соответствие передаточных функций объекта и эталонной модели.

Далее преобразуем разомкнутое управление (18) в соответствии с предложенной в работе [7] схемой фильтрации. Для этого определим сигналы $\omega_{y_{mpr}}$, $\omega_u \in \mathbb{R}^m$, $\omega_{\phi_j} \in \mathbb{R}^m$ ($j = \overline{1, n_d}$), $\omega_r \in \mathbb{R}^N$, $u_{rf}(t) \in \mathbb{R}$ в форме:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{y_{mpr}}(t) &= \Lambda_2 \omega_{y_{mpr}}(t) + h_2 y_m(t + \tau|t), \quad \omega_{y_{mpr}}(0) = 0, \\ \dot{\omega}_u(t) &= \Lambda_2 \omega_u(t) + h_2 u(t), \quad \omega_u(0) = 0, \\ \dot{\omega}_{\phi_j}(t) &= \Lambda_2 \omega_{\phi_j}(t) + h_2 \phi_j(t), \quad (j = \overline{1, n_d}), \quad \omega_{\phi_j}(0) = 0, \\ \dot{\omega}_r(t) &= \Lambda_1 \omega_r(t) + h_1 u_{rf}(t), \quad \omega_r(0) = 0, \\ \dot{u}_{rf}(t) &= -(1/t) u_{rf}(t) + k_l u_r(t), \quad u_{rf}(0) = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Lambda_1 \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $\Lambda_2 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ — диагональные матрицы постоянных коэффициентов вида

$$\Lambda_1 = \text{diag}(-\delta_i), \quad (i = \overline{1, N}), \quad \Lambda_2 = \text{diag}(-\lambda_j), \quad (j = \overline{1, m}),$$

$h_1 \in \mathbb{R}^N$, $h_2 \in \mathbb{R}^m$ — единичные векторы. Заметим, что суммарный порядок системы фильтров (19) будет равен $(2 + n_d)m + N + 1 = n + m(1 + n_d)$.

Очевидно, что сигнал упреждения детерминированной эталонной модели $y_m(t + \tau|t)$, используемый в формуле (19) для формирования вектора $\omega_{y_{mpr}}$, может быть легко получен путем прохождения сигнала $r(t)$ через эталонную модель с передаточной функцией $W_m(s)$ без учета временного запаздывания.

Далее можно утверждать, что в соответствии с соотношениями (17) и (19) существует такой блочный вектор $\Theta^* \in \mathbb{R}^{(m + m + n_d m + N + 1 + n_d + 1)}$:

$$\begin{aligned} \Theta^{*T} &= \rho [\alpha^T, -\beta^T, -\theta_{d1}^* \beta^T, \dots, \\ & \dots, -\theta_{dn_d}^* \beta^T, -\eta^T, -\eta_0, -k_p \theta_d^{*T}, 1], \quad \rho = \frac{1}{k_p}, \end{aligned}$$

(здесь $\theta_d^{*T} = [\theta_{d1}^*, \dots, \theta_{dn_d}^*]$ — известный числовой вектор, α , β , η — известные числовые векторы соответствующих размерностей, η_0 — известное число), что управление вида

$$u(t) = \Theta^{*T} \Omega_m(t), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \Omega_m(t) &= [\omega_{y_{mpr}}^T(t), \omega_u^T(t), \omega_{\phi_1}^T(t), \dots, \\ & \dots, \omega_{\phi_{n_d}}^T(t), \omega_r^T(t), u_{rf}(t), \phi^T(t), u_r(t)]^T, \end{aligned}$$

обеспечивает полное совпадение передаточной функции объекта и эталонной модели.

Представление разомкнутой системы управления в пространстве состояний

Представим сигнал выхода детерминированной эталонной модели (12) в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{m1}(t) &= A_{m1}x_{m1}(t) + b_{m1}u_r(t - \tau); \\ y_m(t) &= c_{m1}^T x_{m1}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_{m1} \in \mathbb{R}^{N+1}$ — вектор состояния эталонной модели; $u_r \in \mathbb{R}$ — задающее воздействие; $y_m \in \mathbb{R}$ — измеряемый выход эталонной модели. Постоянная матрица A_{m1} , векторы b_{m1} , c_{m1} соответствующих размерностей известны. Соответственно, передаточная функция системы (21) определится выражением

$$W_{m1}(s) = c_{m1}^T (sI - A_{m1})^{-1} b_{m1} = \frac{e^{-\tau s}}{R(s)}. \quad (9)$$

Определим расширенный вектор состояния системы $X_f \in \mathbb{R}^{3n}$ в виде

$$\begin{aligned} X_f(t) &= [x^T(t), \omega_{ud}^T(t - \tau), x_{m1}^T(t), \omega_{y_{mpr}}^T(t - \tau), \\ &\quad \omega_r^T(t - \tau), u_{rf}(t - \tau)]^T, \\ \omega_{ud}(t) &= \omega_u(t) + \sum_{j=1}^{n_d} \theta_{dj}^* \omega_{\phi_j}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

где выходы фильтров ω_u , ω_{ϕ_j} ($j = \overline{1, n_d}$), $\omega_{y_{mpr}}$, ω_r и u_{rf} определяются соотношением (19). Тогда неминимальная реализация объекта управления в пространстве X_f примет вид

$$\begin{aligned} \dot{X}_f(t) &= A_f X_f(t) + B_u[u(t - \tau) + d(t - \tau)] + B_r u_r(t - \tau); \\ y(t) &= C_f^T X_f(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где блочные матрицы A_f , B_u , B_r и C_f определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_f &= \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_2 c_{m1}^T & \Lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} b_p \\ h_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{m1} \\ 0 \\ 0 \\ k_l \end{bmatrix}, \\ C_f^T &= [c_p^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \end{aligned}$$

Добавим и отнимем в правой части выражения (24) член $B_u \Theta^{*T} \Omega_m(t - \tau)$. Получим

$$\begin{aligned} \dot{X}_f(t) &= A_f X_f(t) + B_u[\Theta^{*T} \Omega_m(t - \tau) + d(t - \tau)] + \\ &+ B_u[u(t - \tau) - \Theta^{*T} \Omega_m(t - \tau)] + B_r u_r(t - \tau), \end{aligned} \quad (12)$$

$$y(t) = C_f^T X_f(t).$$

После соответствующей группировки выражение (25) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \dot{X}_f(t) &= A_{cf} X_f(t) + B_{cf} u_r(t - \tau) + \\ &+ B_u[u(t - \tau) - \Theta^{*T} \Omega_m(t - \tau)], \end{aligned} \quad (13)$$

$$y(t) = C_f^T X_f(t),$$

где блочные матрицы A_{cf} и B_{cf} имеют вид

$$\begin{aligned} A_{cf} &= \begin{bmatrix} A_p & -\rho b_p \beta^T & 0 & \rho b_p \alpha^T & -\rho b_p \eta^T & -\rho b_p \eta_0 \\ 0 & \Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T & 0 & \rho h_2 \alpha^T & -\rho h_2 \eta^T & \rho h_2 \eta_0 \\ 0 & 0 & A_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_2 c_{m1}^T & \Lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Lambda_1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}, \\ B_{cf} &= [\rho b_p \ \rho h_2 \ b_{m1} \ 0 \ 0 \ k_l]^T. \end{aligned}$$

Если управление u определить выражением (20), то уравнение объекта примет вид

$$\dot{X}_f(t) = A_{cf} X_f(t) + B_{cf} u_r(t - \tau), \quad y(t) = C_f^T X_f(t). \quad (14)$$

При этом в соответствии с формулой (20) передаточная функция полученной системы будет соответствовать передаточной функции эталонной модели (22):

$$W_{m1}(s) = C_f^T (sI - A_{cf})^{-1} B_{cf} e^{-\tau s} = \frac{e^{-\tau s}}{R(s)}. \quad (15)$$

Однако размерность вектора X_f равна $3n$, а порядок передаточной функции W_{m1} равен n^* , что говорит о сокращении нулей и полюсов данной передаточной функции. Учитывая закон управления (20) и выражения для передаточных функций фильтров, восстановим все $3n$ моды для системы (27):

$$\begin{aligned} W_{m1}(s) &= C_f^T (sI - A_{cf})^{-1} B_{cf} e^{-\tau s} = \\ &= \frac{k_p B_0(s) F(s) A_0(s) R(s) e^{-\tau s}}{k_p B_0(s) F(s) A_0(s) R(s) R(s)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Отсюда следует, что $3n$ собственных чисел матрицы A_{cf} совпадают с полюсами передаточной функции (29). Очевидно, что в силу гурвицевости полиномов $B_0(s)$, $F(s)$, $A_0(s)$ и $R(s)$ (объект управления устойчивый и минимально-фазовый) матрица A_{cf} будет **гурвицевой**. При этом неминимальная реализация эталонной модели, передаточная функция которой равна $W_{m1}(s)$, может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \dot{X}_{fm}(t) &= A_{cf}X_{fm}(t) + B_{cf}u_r(t-\tau), \\ y_m(t) &= C_f^T X_{fm}(t), \end{aligned} \quad (17)$$

где $X_{fm} \in \mathbb{R}^{3n}$ — расширенный вектор модели.

Пусть $E_f = X_f - X_{fm}$ и $e = y - y_m$, тогда с учетом (26) и (30) получим уравнение для ошибки

$$\begin{aligned} \dot{E}_f(t) &= A_{cf}E_f(t) + B_{ul}[u(t-\tau) - \Theta^{*T}\Omega_m(t-\tau)], \\ e(t) &= C_f^T E_f(t). \end{aligned} \quad (18)$$

Уравнение (31) перепишем в эквивалентном виде

$$\begin{aligned} \dot{E}_{f1}(t) &= A_{11}E_{f1}(t) + A_{12}E_{f2}(t) + \\ &+ B_{u1}[u(t-\tau) - \Theta^{*T}\Omega_m(t-\tau)], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\dot{E}_{f2}(t) = A_{22}E_{f2}(t),$$

$$e(t) = C_{f1}^T E_{f1}(t),$$

где векторы $E_{f1} \in \mathbb{R}^{(n+m)}$ и $E_{f2} \in \mathbb{R}^{(2n-m)}$ являются составными элементами вектора $E_f = [E_{f1}^T \ E_{f2}^T]^T$, а матрицы $A_{11} \in \mathbb{R}^{(n+m) \times (n+m)}$, $A_{12} \in \mathbb{R}^{(n+m) \times (2n-m)}$, $A_{22} \in \mathbb{R}^{(2n-m) \times (2n-m)}$, $B_{u1} \in \mathbb{R}^{(n+m) \times 1}$ и $C_{f1} \in \mathbb{R}^{1 \times (n+m)}$ являются блоками следующих матриц:

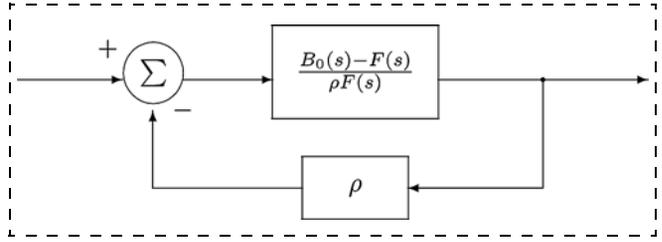
$$A_{cf} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B_{ul} = \begin{bmatrix} B_{u1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_f = \begin{bmatrix} C_{f1}^T & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Учитывая тот факт, что матрица A_{22} — гурвицева и $E_{f2}(0) = 0$, в соответствии с (26) и (30) будет выполнено условие $E_{f2}(t) \equiv 0$. Тогда уравнение (32) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \dot{E}_{f1}(t) &= A_{11}E_{f1}(t) + B_{u1}[u(t-\tau) - \Theta^{*T}\Omega_m(t-\tau)], \\ e(t) &= C_{f1}^T E_{f1}(t), \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$A_{11} = \begin{bmatrix} A_p & -\rho b_p \beta^T \\ 0 & \Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T \end{bmatrix}, \quad B_{u1} = \begin{bmatrix} b_p \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad C_{f1} = \begin{bmatrix} c_p^T & 0 \end{bmatrix}.$$



Структурная схема передаточной функции $\beta^T (sI - [\Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T])^{-1} h_2$

При этом передаточная функция системы (33) с учетом свойства обращения блочной матрицы определяется выражением

$$\begin{aligned} W_e(s) &= C_{f1}^T (sI - A_{11})^{-1} B_{u1} e^{-\tau s} = \\ &= C_{f1}^T \begin{bmatrix} (sI - A_p)^{-1} & -(sI - A_p)^{-1} b_p \rho \beta^T (sI - [\Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T])^{-1} \\ 0 & (sI - [\Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T])^{-1} \end{bmatrix} B_{u1} e^{-\tau s} = \\ &= c_p^T (sI - A_p)^{-1} b_p [1 - \rho \beta^T (sI - [\Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T])^{-1} h_2] e^{-\tau s}. \end{aligned} \quad (21)$$

Используя (17) и (19), получим следующие соотношения:

$$c_p^T (sI - A_p)^{-1} b_p = W_0(s) = k_p \frac{B_0(s)}{A_0(s)},$$

$$\beta^T (sI - \Lambda_2)^{-1} h_2 = W_2(s) = k_p \frac{B_0(s) - F(s)}{F(s)}.$$

Далее, используя тот факт, что структурная схема передаточной функции $\beta^T (sI - [\Lambda_2 - \rho h_2 \beta^T])^{-1} h_2$ имеет вид, представленный на рисунке, получим окончательное выражение для передаточной функции $W_e(s)$:

$$\begin{aligned} W_e(s) &= k_p \frac{B_0(s)}{A_0(s)} \left[1 - \frac{\rho [B_0(s) - F(s)]}{\rho B_0(s)} \right] e^{-\tau s} = \\ &= k_p \frac{B_0(s) F(s)}{A_0(s) B_0(s)} e^{-\tau s} = k_p \frac{F(s)}{A_0(s)} e^{-\tau s}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, $(n+m)$ мод для системы (33) совпадают с нулями и полюсами передаточной функции объекта $W_0(s)$. Так как разомкнутая структура контроллера может быть использована только для устойчивого минимально-фазового объекта (полиномы $B_0(s)$ и $A_0(s)$ — гурвицевы), то передаточная функция $W_e(s)$ без учета временного запаздывания является также устойчивой и минимально-фазовой.

Синтез адаптивного закона управления

Синтез алгоритма управления рассмотрим для случая, когда эксцесс полюсов передаточной функции объекта $n^* = 1$ ($L(s) = 1$).

Закон адаптивного управления зададим в виде

$$u(t) = \Theta^T(t)\Omega_m(t), \quad (23)$$

где $\Theta \in \mathbb{R}^{(n+m+1)}$ — вектор настраиваемых параметров.

Уравнение для ошибки $e(t)$ с учетом соотношений (34) и (36) примет вид

$$\dot{E}_{f1}(t) = A_{11}E_{f1}(t) + \hat{B}_{u1} \frac{1}{\rho} [\Theta(t-\tau) - \Theta^*]^T \Omega_m(t-\tau), \quad (24)$$

$$e(t) = C_{f1}^T E_{f1}(t),$$

где $\hat{B}_{u1} = B_{u1}\rho$. Передаточная функция данной системы, без учета временного запаздывания, является **строго положительно-действительной** и определяется в соответствии с выражением (35) как

$$W_e(s) = C_{f1}^T (sI - A_{11})^{-1} \hat{B}_{u1} e^{-\tau s} = \frac{F(s)}{A_0(s)} e^{-\tau s}. \quad (25)$$

Как видно из выражения (38), использовать для синтеза адаптивного регулятора классическую схему, основанную на прямом методе Ляпунова, мешает временное запаздывание τ в сигнале $\Theta(t-\tau)$. Для решения данной проблемы воспользуемся концепцией, предложенной Монополи [1] и развитой в работах [7–10]. Осуществим модификацию схемы Монополи для разомкнутой структуры регулятора, оставив ее главные элементы: *вспомогательную модель и расширенную ошибку*.

Зададим сигнал *расширенной ошибки* в виде

$$e_a(t) = e(t) - y_a(t) = y(t) - y_m(t) - y_a(t), \quad (26)$$

где y_a — выход *вспомогательной модели*, которую определим уравнением

$$y_a(s) = W_a(s)u_a(s),$$

$$W_a(s) = \frac{L(s)}{R(s)} = \frac{1}{R(s)} = \frac{T}{Ts+1}, \quad (27)$$

где u_a — управляющий вход *вспомогательной модели*, который будет определен ниже.

Новую цель управления определим в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_a(t) = 0. \quad (28)$$

Очевидно, что если потребовать выполнения целевых условий (41) и

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_a(t) = 0, \quad (29)$$

то будет выполнена исходная цель управления (7).

Для представления в пространстве состояний *вспомогательной модели* проведем эквивалентные преобразования с уравнением (40) и получим

$$y_a(s) = \frac{k_l T}{Ts+1} [(\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(s) - (\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(s) + u_a(s)], \quad (30)$$

где

$$(\tilde{\theta}^*)^T = [-\alpha^T, \eta_0], \quad (31)$$

$$\omega_a^T(s) = [\omega_{\lambda y_a}^T(s), y_a(s)],$$

$$\dot{\omega}_{\lambda y_a}(t) = \Lambda_2 \omega_{\lambda y_a}(t) + h_2 y_a(t), \quad \omega_{\lambda y_a}(0) = 0. \quad (32)$$

Тогда получим

$$y_a(s) = \frac{R(s) - \Gamma(s)}{R(s)} y_a(s) - \frac{1}{R(s)} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} y_a(s) + \frac{1}{R(s)} [u_a(s) - (\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(s)], \quad (33)$$

или

$$\left[\Gamma(s) + \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} \right] y_a(s) = [u_a(s) - (\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(s)]. \quad (34)$$

Таким образом, используя соотношение (19), уравнение для *вспомогательной модели* y_a в терминах передаточных функций можно записать в виде

$$y_a(s) = k_p \frac{F(s)}{A_0(s)} [\rho u_a(s) - \rho (\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(s)]. \quad (35)$$

Теперь с учетом соотношений (30), (48) и того факта, что для нашего случая ($n^* = 1, L(s) = 1$), неминимальная реализация в пространстве состояний для *вспомогательной модели* y_a может быть представлена уравнением

$$\dot{Y}_a(t) = A_{11} Y_a(t) + \hat{B}_{u1} [u_a(t) - (\tilde{\theta}^*)^T \omega_a(t)], \quad (36)$$

$$y_a(t) = C_{f1}^T Y_a(t),$$

где $Y_a \in \mathbb{R}^{(n+m)}$ — расширенный вектор *вспомогательной модели*, причем в соответствии с выражениями (35) и (48) передаточная функция системы (49) имеет вид

$$W_{y_a}(s) = C_{f1}^T (sI - A_{11})^{-1} \hat{B}_{u1} = \frac{F(s)}{A_0(s)}. \quad (37)$$

Управляющий вход *вспомогательной модели* зададим уравнением

$$u_a(t) = \psi(t)\xi(t),$$

$$\xi(t) = [\Theta(t-\tau)^T \Omega_{mpr}(t-\tau) - \Theta(t)^T \Omega_{mpr a}(t)], \quad (38)$$

где $\psi(t) \in \mathbb{R}$ — настраиваемый параметр,

$$\Omega_{mpr a}(t) = \Omega_{mpr}(t-\tau) + [\omega_{\lambda y_a}^T(t) \ 0 \ \dots \ 0 \ y_a(t)]^T. \quad (39)$$

Тогда уравнение возмущенного движения для *расширенной ошибки*

$$E_a(t) = E_{f1}(t) - Y_a(t)$$

с учетом выражений (37), (49) и (51) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_a(t) &= A_{11}E_a(t) + \\ &+ \hat{B}_{u1} \left[\left(\frac{1}{\rho} - \psi(t) \right) \xi(t) + \frac{1}{\rho} [\Theta(t) - \Theta^*]^T \Omega_{mprd}(t) \right], \\ e_a(t) &= C_{f1}^T E_a(t). \end{aligned} \quad (40)$$

Для поиска алгоритма адаптации настраиваемых параметров $\Theta(t)$ и $\psi(t)$ воспользуемся прямым методом Ляпунова. Зададим функцию Ляпунова $V(t)$ в виде

$$\begin{aligned} 2V(t) &= E_a^T(t) P E_a(t) + \\ &+ \frac{1}{|\rho|} (\Theta(t) - \Theta^*)^T \tilde{\Phi}^{-1} (\Theta(t) - \Theta^*) + \Phi_{\psi}^{-1} \left[\frac{1}{\rho} - \psi(t) \right]^2, \end{aligned} \quad (41)$$

где $P = P^T > 0$, $\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}^T > 0$, $\Phi_{\psi} > 0$ — положительно определенные симметричные матрицы соответствующих размеров и число.

Поскольку передаточная функция системы (37) без учета временного запаздывания является **строго положительно-действительной**, то в соответствии с леммой Калмана—Якубовича [12, 13] существуют такие $P = P^T > 0$, $Q = Q^T > 0$, что выполняется условие

$$\begin{aligned} A_{11}^T P + P A_{11} &= -2Q, \\ P \hat{B}_{u1} &= C_{f1}. \end{aligned} \quad (42)$$

Если алгоритмы настройки параметров $\Theta(t)$ и $\psi(t)$ определить выражениями

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}(t) &= -\text{sign}(k_p) \tilde{\Phi} e_a(t) \Omega_{mprd}(t), \\ \dot{\psi}(t) &= \Phi_{\psi} e_a(t) \xi(t), \end{aligned} \quad (43)$$

то полная производная по времени от функции Ляпунова с учетом условий (55) примет вид

$$\dot{V}(t) = -E_a^T(t) Q E_a(t) < 0. \quad (44)$$

Таким образом [14], адаптивное управление (36), (51) и алгоритм настройки (56) гарантируют, что $V(t)$ и, следовательно, сигналы $E_a(t)$, $e_a(t)$, $\Theta(t)$ и $\psi(t)$ ограничены, т. е. $E_a(t)$, $e_a(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t) \in L_{\infty}$. Из соотношений (56) и (57) мы устанавливаем, что $E_a(t)$, $e_a(t) \in L_2$. В соответствии с формулой (54) и на основании рассуждений, приведенных в работе [14], следует также ограниченность сигнала $\dot{E}_a(t)$, т. е. $\dot{E}_a(t) \in L_{\infty}$. Из выполнения условий $E_a(t) \in L_{\infty} \cap L_2$, $\dot{E}_a(t) \in L_{\infty}$ следует выполнение промежуточной цели функционирования системы (41). При этом

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \Theta(t) &= \Theta^0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) &= \psi^0, \end{aligned} \quad (45)$$

где Θ^0 , ψ^0 — постоянный вектор и число, это означает в соответствии с выражением (37), что все сигналы в замкнутой системе ограничены. Кроме того, если сигнал $r(t)$ такой, что объект идентифицируем [15], тогда $\Theta^0 = \Theta^*$, и в соответствии с выражением (37) мы получим выполнение исходной цели функционирования системы (7), в противном случае замкнутая система будет обладать свойством диссипативности.

Заключение

В работе предложена новая схема адаптивного управления со вспомогательной моделью устойчивыми объектами "один вход—один выход" с входным запаздыванием и неизмеряемым возмущением. Предложенная структура адаптивного управления содержит только блоки с сосредоточенным запаздыванием, что упрощает практическую реализацию таких систем.

Список литературы

1. **Monopoli R. V.** Model reference adaptive control with an augmented error signal // IEEE Trans. Aut. Contr. AC-19. 1974. P. 474—484.
2. **Narendra K. S., Annaswamy A. M.** Robust adaptive control in the presence of bounded disturbances // IEEE Trans. Aut. Contr. AC-31. 1986. P. 306—315.
3. **Миркин Е. Л.** Синтез адаптивно робастного регулятора, функционирующего в скользящем режиме // Проблемы автоматки и процессов управления. Бишкек: Илим, 1994. С. 68—77.
4. **Ortega R., Lozano R.** Globally stable adaptive controller for systems with delay // Int. J. Control. 1988. Vol. 47, no. 1. P. 17—23.
5. **Narendra K. S., Annaswamy A. M.** Stable Adaptive Systems. New-York: Prentice-Hall, 1989.
6. **Mirkin E. L.** Combination of sliding mode and reference model prediction methods for adaptive control of input delay systems // Proc. of the 7th International Workshop on Variable Structure Systems. Sarajevo, 17—19 July 2002. P. 153—162.
7. **Миркин Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.** Адаптивные системы управления сложными объектами. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
8. **Миркин Е. Л., Шаршеналиев Ж. Ш.** Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью для объектов с запаздыванием по управлению // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 159—171.
9. **Шаршеналиев Ж. Ш., Миркин Е. Л.** Синтез модифицированных алгоритмов адаптивного управления процессом роста монокристаллов кремния // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 37—44.
10. **Шаршеналиев Ж. Ш., Миркин Е. Л.** Разработка алгоритмов управления SISO-системами со вспомогательной моделью и пропорционально-интегральными цепями настройки параметров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 10—14.
11. **Mirkin B. M., Mirkin E. L., Gutman P.-O.** State-feedback adaptive tracking of linear systems with input and state delays // International journal of adaptive control and signal processing. 2009. Vol. 23, no. 6. P. 567—580.
12. **Kalman R. E.** Liapunov functions for the problem of Lure in automatic control // Proc. of Nat'l Acad. Sci. February 1963. Vol. 49. P. 201—205.
13. **Monopoli R. V.** The Kalman — Yacobovich lemma in adaptive control system design // IEEE Trans. Aut. Contr. AC-18. 1973. P. 527—529.
14. **Ioannou P. A., Sun J.** Robust Adaptive Control. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
15. **On identifiability of linear time-delay systems / R. Orlov, L. Belkoura, J. Richard, M. Dambrine // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. no. 8. P. 1319—1324.**

Adaptive Control Design for SISO Plants with Input Delays and Unmeasured Perturbations

E. L. Mirkin¹, eugene_mirkin@mail.ru✉, Zh. Sh. Sharshenaliev², avtomatika_nankr@mail.ru,
¹ International University of Kyrgyzstan, Bishkek, 720071, Kyrgyzstan,

² Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences (Kyrgyzstan),
Bishkek, 720071, Kyrgyzstan

Corresponding authors: **Mirkin Evgeniy L.**, D. Sc, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems of the International University of Kyrgyzstan, Bishkek, 720071, Kyrgyzstan, e-mail: eugene_mirkin@mail.ru

Received on May 05, 2015

Accepted on May 25, 2015

Time delay is a phenomenon often encountered in control system designs. Most typically, the delayed systems emerge in transport, communications, chemical processes and power systems. Control of such systems is a difficult problem even in the deterministic settings, not talking about the situations when the parameters of the system are either not completely defined, or they change their values in the process of functioning. In this paper, a new reference model of the adaptive control scheme is proposed for the plants with an input delay and unmeasured perturbations, including some new adaptive control algorithms in the class of systems with an auxiliary model and enhanced error. The synthesized algorithms guarantee stability of the closed control system. Achievement of the control target is ensured by the presence of a closed loop signal with a rich spectrum, otherwise a dissipation system. Application of this scheme allows a reduction of the number of the adjustable parameters of the adaptive controller down to the number of the unknown coefficients of the system. The proposed structure of the adaptive control contains only units with lumped delays, which considerably simplifies implementation of such systems in practice.

Keywords: adaptive systems, SISO systems, advanced error, dissipation

For citation:

Mirkin E. L., Sharshenaliev Zh. Sh. Adaptive Control Design for SISO Plants with Input Delays and Unmeasured Perturbations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 651–658.

DOI: 10.17587/mau.16.651-658

Reference

1. Monopoli R. V. Model reference adaptive control with an augmented error signal, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 1974, AC-19, pp. 474–484.
2. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Robust adaptive control in the presence of bounded disturbances, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 1986, AC-31, pp. 306–315.
3. Mirkin E. L. *Sintez adaptivno robustnogo regulyatora, funkcioniruyushogo v skol'zhashem regime* (Synthesis of robust adaptive controller operating in sliding mode), *Problemi Avtomatiki i Processy Upravleniya*, Bishkek, Him, 1994, pp. 68–77 (in Russian).
4. Ortega R., Lozano R. Globally stable adaptive controller for systems with delay, *Int. J. Control*, 1988, vol. 47, no. 1, pp. 17–23.
5. Narendra K. S., Annaswamy A. M. *Stable Adaptive Systems*, New-York, Prentice-Hall, 1989.
6. Mirkin E. L. Combination of sliding mode and reference model prediction methods for adaptive control of input delay systems, *Proceeding of the 7th International Workshop on Variable Structure Systems*, Sarajevo, 17–19 July 2002, pp. 153–162.
7. Mirkin E. L., Sharshenaliev Zh. Sh. *Adaptivnie sistemy upravleniya slozhnimi ob'ektami* (Adaptive control systems of complex objects), Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 (in Russian).
8. Mirkin E. L., Sharshenaliev Zh. Sh. *Sintez adaptivnykh sistem upravleniya c vspomogatel'noi model'yu dlya ob'ektov c zapazdvaniem po upravleniyu* (Model reference adaptive control design for plants with input delays), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2010, no. 11, pp. 159–171 (in Russian).
9. Sharshenaliev Zh. Sh., Mirkin E. L. *Sintez modifitsirovannykh algoritmov upravleniya processom rosta monokristallov kremniya* (Synthesis of modified algorithms of adaptive control process of growth of single crystals of silicon), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 3, pp. 37–44 (in Russian).
10. Mirkin E. L., Sharshenaliev Zh. Sh. *Razrabotka algoritmov upravleniya SISO sistemami so vspomogatel'noi model'yu i proporcional'no-integral'nimi cepyami nastroiki parametrov* (Synthesis of control algorithms SISO systems with auxiliary model and a proportional-integral connections settings), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 10–14 (in Russian).
11. Mirkin B. M., Mirkin E. L., Gutman P.-O. State-feedback adaptive tracking of linear systems with input and state delays, *International journal of adaptive control and signal processing*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 567–580.
12. Kalman R. E. Liapunov functions for the problem of Lure in automatic control, *Proc. of Nat'l Acad. Sci.*, vol. 49, February 1963, pp. 201–205.
13. Monopoli R. V. The Kalman — Yacobovich lemma in adaptive control system design, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 1973, AC-18, pp. 527–529.
14. Ioannou P. A., Sun J. *Robust Adaptive Control*, New Jersey, Prentice-Hall, 1996.
15. Orlov R., Belkoura L., Richard J., Dambrine M. On identifiability of linear time-delay systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, no. 8, pp. 1319–1324.

Н. П. Деменков, канд. техн. наук, доц., dnp@bmsu.ru,
И. А. Мочалов, д-р техн. наук, проф., intelsyst@mail.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Нейросетевая оценка динамики системы автоматической оптимизации

Рассматривается система автоматической оптимизации нелинейного объекта управления на основе алгоритма поиска экстремума нелинейности и запоминания экстремума. Для оценки динамики выхода объекта предложен нейросетевой метод в виде трехслойной персептронной сети с функцией активации сигмоидального типа. Неизвестные параметры сети находятся из решения нелинейной оптимизационной задачи. Приведены результаты моделирования переходного процесса поиска экстремума нелинейности нейросетевым методом.

Ключевые слова: система автоматической оптимизации, объект управления нелинейность—линейность, нейросетевой метод решения нелинейного дифференциального уравнения

Введение

В автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) в энергетике, химии, черной металлургии и в других отраслях важное место занимают системы автоматической оптимизации (САО), которые, как правило, реализуются на уровне локальной автоматики при управлении электроприводами, входящими в состав соответствующих мехатронных систем или робототехнических комплексов.

Системы автоматической оптимизации целесообразно применять в следующих случаях:

1) если существует показатель качества, с изменением которого происходит достаточно ощутимое изменение технико-экономической эффективности;

2) когда выгоды от увеличения технико-экономической эффективности существенно компенсируют затраты, обусловленные применением принципа экстремального управления;

3) если существуют возможности определения экстремума функционала качества и воздействия на регулирующие органы объекта в целях получения экстремального режима его работы.

Экстремальное управление применяют также в сложных системах комплексной автоматизации. При этом ставится задача определения оптимальных настроек локальных регуляторов автоматических систем из условия экстремума некоторого показателя качества в статических или установившихся режимах при различных возмущениях, нарушающих экстремальный режим.

В промышленных системах обычно используются поисковые САО, в состав которых входит экстремальный регулятор (ЭР). Применение поисковых систем обусловлено воздействием на нелинейную часть, представленную виде экстремальной статической характеристики, различного рода возмущений в виде монотонных и случайных помех, а также наличием у объекта значительной инерционности. Эти обстоятельства исключают применение классических следящих или стабилизирующих

систем управления и приводят к необходимости использования поисковых САО.

В настоящее время теория и практика адаптивных систем, в частности САО с ЭР, достаточно хорошо изучена, и ее элементы входят в состав классических дисциплин по автоматическому управлению [1–3]. Однако в это же время достигнуты значительные успехи в теоретических исследованиях интеллектуальных систем управления, в частности, разработаны элементы теории нечеткого управления, нейронных сетей [4], предложены нечеткие нейросетевые методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных [5–7] и т. д. Поэтому возникает потребность в решении традиционных задач управления путем использования новых методов, реализуемых в интеллектуальных системах. Актуальность исследования таких направлений обусловлена тем фактом, что традиционные методы регулирования, требуя построения математических моделей, реализуемых на основе теории линейных и линеаризуемых систем, не в состоянии обеспечить требуемое качество регулирования технологических параметров многих промышленных объектов, являющихся по своей природе нелинейными.

Усовершенствование существующих алгоритмов управления с внедрением современных методов обработки информации и, в частности, методов искусственного интеллекта является перспективным направлением научно-прикладной деятельности. Одним из таких методов является применение нейронных сетей, возможность использования которых связана, прежде всего, с их универсальной аппроксимирующей способностью. Нейронные сети широко используются для решения как инженерных, так и научных задач. Поскольку они оказались весьма эффективным средством обработки информации, постоянно делаются попытки расширить область их применения или найти новые принципы их построения и работы.

В данной статье решается традиционная задача построения переходных процессов в координатах выход — время (z, t) и выход — вход (z, x) объекта с использованием нейросетевого метода приближенного решения нелинейного дифференциального уравнения, которое возникает при описании процесса экстремального управления по алгоритму с запоминанием экстремума. По сравнению с известными численными методами Эйлера, Рунге—Кутты и другими предложенный нейросетевой метод отличается значительной простотой, относительно высокой точностью за счет выбора числа нейронов в скрытом слое, возможностью использования нейроконтроллера, обеспечивающего значительное быстроедействие [8, 9], и другими свойствами.

Постановка задачи

Рассматривается объект управления (ОУ), который имеет нелинейную часть в виде статической характеристики $f(x)$ экстремального типа и линейную часть, представляемую апериодическим звеном первого порядка с известной постоянной времени T . Для нахождения точки (x^*, y^*) оптимума зависимости $y = f(x)$ используется экстремальный регулятор с запоминанием экстремума [3].

Управляющее воздействие на ОУ формируется в результате выявления разности между текущим значением показателя качества и его экстремальным значением. В качестве регулятора чаще всего используется сервопривод. Для определения экстремального значения показателя качества используют запоминающее устройство (ЗУ), включаемое параллельно каналу, через который проходит сигнал текущего значения показателя качества (рис. 1).

ЗУ реагирует только на увеличение сигнала z (при максимуме). До тех пор, пока максимум не достигнут, сигналы, поступающие на элемент сравнения, равны, и их разность равна нулю. После достижения экстремального значения z_m показатель качества при дальнейшем увеличении сигнала x на входе экстре-

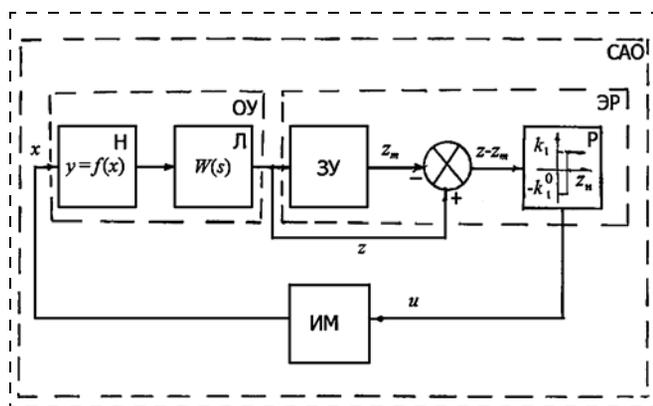


Рис. 1. Структурно-функциональная схема САО: ОУ — объект управления, Н — нелинейная, Л — линейная части ОУ, ЭР — экстремальный регулятор, ЗУ — запоминающее устройство, Р — реле с зоной нечувствительности, ИМ — исполнительный механизм

мального звена будет уменьшаться. В результате этого появится сигнал на входе логического устройства (реле Р), формирующий сигнал управления $u = k_1 \text{sign}(z - z_m)$ и воздействующий на систему так, чтобы происходило уменьшение сигнала x и возрастание показателя качества z . После срабатывания логического устройства поступает сигнал на стирающие z_m в ЗУ. Далее процесс поиска экстремума повторяется. Система с запоминанием экстремума является релейной, поэтому протекающие в ней процессы будут иметь колебательный характер. Амплитуда колебаний показателя качества определяется зоной нечувствительности z_n релейного элемента, формирующего сигнал управления как функцию разности $z - z_m$.

Достоинством систем с запоминанием экстремума является сравнительно небольшая амплитуда колебаний параметров в процессе поиска. Применение их наиболее целесообразно для малоинерционных объектов, имеющих высокочастотные помехи.

Для простоты дальнейшего рассмотрения будем полагать отсутствие каких-либо возмущений, воздействующих на объект управления.

Системы с запоминанием экстремума обычно имеют исполнительные механизмы с постоянной скоростью перемещения. На вход объекта управления с помощью исполнительного механизма (ИМ) подается линейно изменяющийся во времени сигнал

$$x(t) = x_0 \pm k_1 t,$$

где $k_1 = \text{const}$ — скорость изменения входа; x_0 — начальная координата входа; знак "±" характеризует направление скорости, определяемое реле с зоной нечувствительности z_n (рис. 1). Очевидно, что

$$\frac{dx}{dt} = \pm k_1.$$

Будем полагать, что в начальный момент времени t_0 вход $x_0 > 0$ и принадлежит левой ветви зависимости $y = f(x)$ (рис. 2, а).

Тогда с увеличением входа $x(t)$ также будет увеличиваться с учетом инерционности объекта управления его выход $z(t)$. В момент $t = t_1$ выход $z(t)$ достигает точки M_1 (рис. 2, а, б), которая принадлежит правой ветви зависимости $y = f(x)$. Максимальное значение z_m фиксируется в ЗУ. При достижении в момент времени $t = t_2$ разностью $z(t_2) - z_m$ значения зоны нечувствительности z_n происходит переключение реле в противоположное состояние, что приводит к изменению направления скорости перемещения исполнительного механизма (рис. 2, в), и значение выхода $z(t > t_2)$ начинает увеличиваться до тех пор, пока $z(t)$ в момент $t = t_3$ не достигнет своего максимума z_m в точке M_3 , принадлежащей левой ветви зависимости $y = f(x)$. При $t > t_3$ величина $z(t)$ уменьшается и т. д. до тех пор, пока в системе не установится периодический режим относительно точки (x^*, y^*) .

Цель работы состоит в приближенной оценке переходных процессов (например, участок M_1M_2 и другие) с использованием нейронной сети персептронного типа в координатах выход—время (z, t) объекта. Это даст возможность построить приближенную оценку фазовой траектории процесса в координатах (z, x).

Метод решения

Для САО, структурная схема которой изображена на рис. 1, справедлива следующая нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$T\dot{z}(t) + z(t) = f(x(t)) \text{ при } z(t_0) = z_0; \quad (1a)$$

$$u = k_1 \text{sign}(z - z_m + z_H); \quad (1б)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm k_1 \text{ при } x(t_0) = x_0. \quad (1в)$$

Здесь уравнение (1a) — модель объекта управления типа нелинейность—линейность с постоянной времени T ; соотношение (1б) — модель экстремального регулятора; уравнение (1в) — модель исполнительного механизма.

Аппроксимируем выход объекта $z(t)$ функцией

$$z_a(t) = \alpha(t) + \beta(t, N(t, p)),$$

где $\alpha(t)$ — настраиваемый параметр по начальному условию; $\beta(t, N(t, p))$ — функция, зависящая от трехслойной нейросети $N(t, p)$ с настраиваемым вектором параметров p и смещением B (рис. 3).

Число слоев в многослойной нейронной сети характеризует то, каким образом входное пространство может быть разбито на подпространства меньшей размерности. Трехслойная нейронная сеть, где в качестве двух последних слоев используются нейронные элементы с нелинейной функцией активации, позволяет формировать любые выпуклые области в пространстве решений.

Функция активации $\varphi(t)$ нейросети должна быть нелинейной и монотонной с вещественным выходным сигналом. Таким требованиям удовлетворяет функция сигмоидального типа

$$\varphi(t) = (1 - e^{-t})^{-1},$$

для которой выполняется очевидное свойство

$$\frac{d\varphi}{dt} = \varphi(t)(1 - \varphi(t)).$$

Введение функции сигмоидального типа обусловлено ограниченностью нейронных сетей с пороговой функцией активации нейронов, при которой любой из выходов сети равен либо нулю, либо единице, что ограничивает использование нейросетей в задачах идентификации. Использование сигмоидальной функции позволяет перейти от бинарных выходов нейрона к аналоговым. Функции передачи такого типа, как правило, присущи нейронам, находящимся во внутренних слоях нейронной сети.

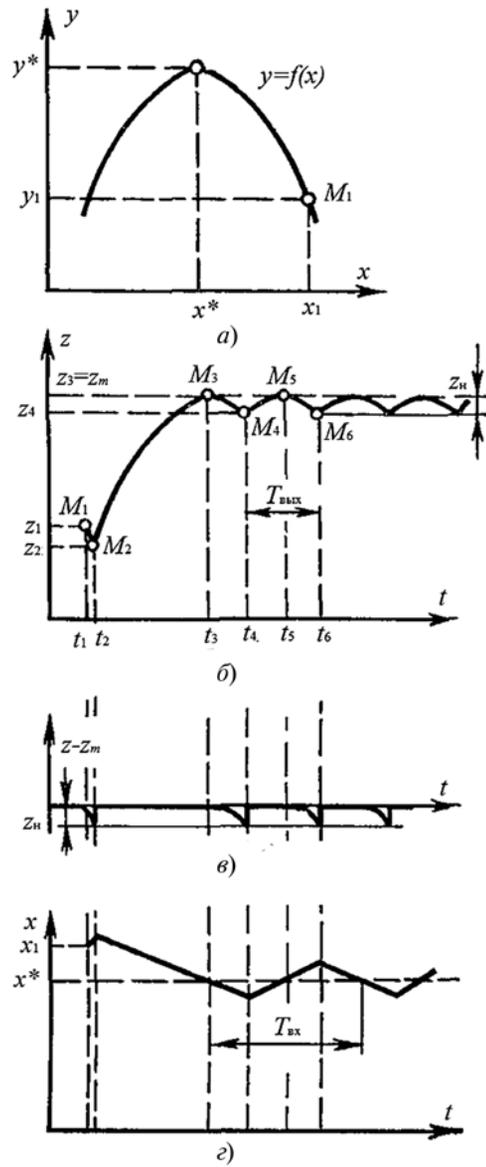


Рис. 2. Динамика $z(t)$ объекта управления типа нелинейность—линейность с запоминанием экстремума

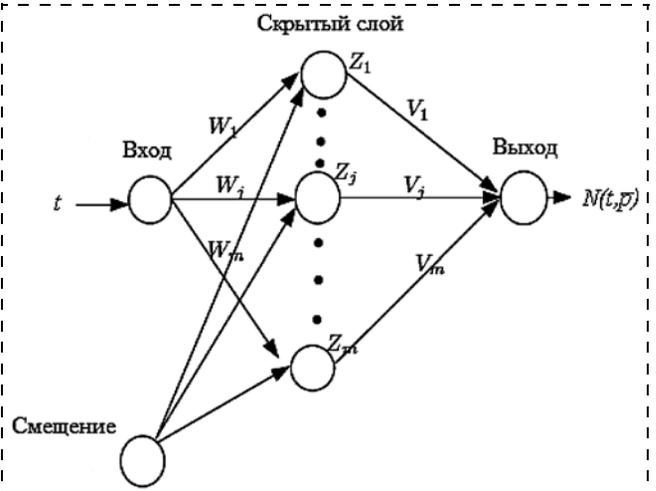


Рис. 3. Нейросеть оценки переходного процесса $z(t)$ в САО с запоминанием экстремума

Для входа x входной нейрон не делает никаких изменений, поэтому вход t для скрытых нейронов равен

$$(Net)_j = tW_j + B_j, j = 1, \dots, m,$$

где W_j — веса параметров входного слоя для j -го нейрона в скрытом слое; B_j — вес смещения для j -го нейрона в скрытом слое; m — число нейронов.

Выход скрытого слоя равен

$$z_j = S(Net)_j, j = 1, \dots, m,$$

где S — функция активации, которая является обычной нелинейной функцией. Поэтому выход для нейрона равен

$$N = V_1z_1 + \dots + V_jz_j + \dots + V_mz_m,$$

где V_j — вес параметра для j -го выхода в скрытом слое.

Таким образом, первое слагаемое в формуле (1а) задается в виде

$$\begin{aligned} T\dot{z}(t) &= T \frac{d(tN(t,p))}{dt} = T[1 \cdot N(t,p) + t\dot{N}(t,p)] = \\ &= T[N(t,p) + t \sum_{i=1}^m V_i z_i (1 - z_i) W_i] = \\ &= TN(t,p) + Tt \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^m V_i (1 + \exp(-W_i t + B_i))^{-1} \right) = \\ &= TN(t,p) + Tt \left(\sum_{i=1}^m V_i z_i (1 - z_i) W_i \right). \end{aligned}$$

Сигнал ошибки решения нейронной сети определяется как разность между желаемым и действительным выходными сигналами в дискретные моменты времени t_i .

Суммарная ошибка сети выбрана в качестве функционала оптимизации, минимум которого необходимо найти. В качестве таких функционалов можно использовать минимум суммы квадратов функции ошибки.

Суммарная ошибка E аппроксимации для системы уравнений (1) равна

$$E(p) = \sum_{i=1}^n e_i^2(p) = 0,5 \sum_{i=1}^n [T\dot{z}(t_i, p) + z(t_i, p) - f(x(t_i))]^2,$$

где $\{t_i\}_{i=1}^n$ — дискретные точки промежутка времени $[0, T]$, соответствующего дискретному множеству $\{M_1M_2, M_2M_3$ и т. д.} (рис. 2, б), $n = T/\delta$ — число обучающих выборок, δ — шаг по времени t .

Вектор p неизвестных параметров находится из решения нелинейной относительно p оптимизационной задачи

$$\min_p E(p),$$

в которой составляющие вектора p имеют вид $p^T = (V_1, W_1, B_1; V_2, W_2, B_2; \dots, V_m, W_m, B_m)$.

В качестве метода поиска экстремума функционала оптимизации можно использовать модифицированный метод градиентного спуска. Выбор начальных условий осуществляется случайным образом из диапазона значений входного сигнала.

Вычислительный эксперимент

Исследовали САО с объектом управления со статической характеристикой $y = f(x(t)) = x^2$ и передаточной функцией инерционного звена на выходе объекта управления

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1} \Big|_{T=100c} = \frac{1}{100s + 1}.$$

Исполнительный механизм описывали уравнением (1в), в котором $k_1 = 0,1$. Зона нечувствительности z_H реле задавалась равной $z_H = 0,65$. Шаг по времени $\Delta t = \delta = 10$ с, полное время $T = 150$ с. Поэтому за один шаг по времени δ исполнительный механизм переместится на величину $\Delta x = \pm k_1 \Delta t = \pm 1$.

Для моделирования нейросети число нейронов m было принято равным трем, а суммарная ошибка E — равной 10^{-2} .

По результатам расчетов построена нейросетевая аппроксимация переходного процесса $z(t)$ выхода объекта управления (рис. 4).

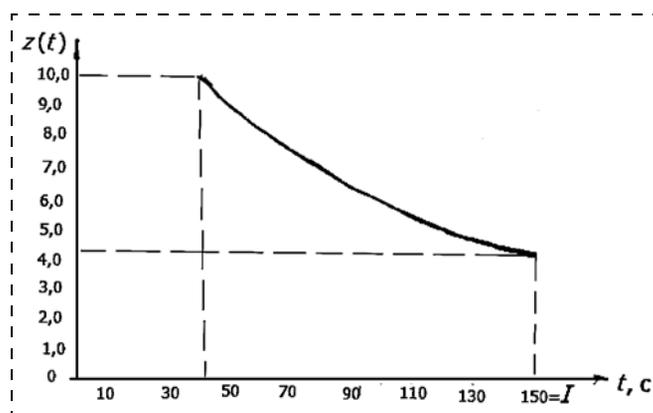


Рис. 4. Нейросетевая аппроксимация зависимости выхода $z(t)$ для объекта управления

Результаты эксперимента показали, что нейросеть из трех нейронов обеспечила возможность построения приближенной оценки фазовой траектории процесса в координатах (z, x) с заданной точностью.

Выводы

Рассмотрена классическая система автоматической оптимизации линейного объекта управления с нелинейностью и алгоритмом поиска экстремума нелинейности с запоминанием экстремума.

Динамику выхода объекта оценивали приближенным методом, в качестве которого предложено использовать нейросетевой метод в виде трехслойной персептронной сети с функцией активации сигмоидального типа.

Неизвестные параметры сети находятся из решения нелинейной оптимизационной задачи.

Результаты расчета переходного процесса поиска экстремума нелинейности нейросетевым методом показывают эффективность предложенного нейросетевого метода по сравнению с известными численными методами, отличаясь значительной простотой и относительно высокой точностью за счет выбора числа нейронов в скрытом слое, а также значительным быстродействием.

Список литературы

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975.

2. Растринин Л. А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974.
3. Казакевич В. В., Родов А. Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977.
4. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. К. А. Пупкова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
5. Otadi M., Mosleh M. Numerical solution of quadratic Riccati differential equation by neural network // *Mathematical sciences*. 2011. Vol. 5, N. 3. P. 249–257.
6. Buckley J. J., Feuring T. Fuzzy differential equations // *Fuzzy sets and systems*. 2000. N. 11. P. 43–54.
7. Buckley J. J., Feuring T. Introduction to fuzzy partial differential equations // *Fuzzy sets and systems*. 1999. N. 5. P. 241–248.
8. Комарцова Л. Г., Максимов А. В. Нейрокомпьютеры. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
9. Галушкин А. И. Нейросетевые технологии в перспективных суперЭВМ. Концепция развития высокопроизводительных вычислений на базе супернейрокомпьютеров (2012–2020 гг.) // Информационные технологии. 2013. № 9. 32 с.

Neural Network Estimation of the Dynamics of the Automatic Optimization System

N. P. Demenkov, dnp@bmstu.ru✉, I. A. Mochalov, intelsyst@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Demenkov Nikolay P., Ph. D., Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Faculty of Information and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: dnp@bmstu.ru

Received on April 01, 2015

Accepted on April 24, 2015

The topic of the article is a search engine for an automatic optimization of the nonlinear object of control with algorithm for search of the extremum of nonlinearity and storing of the extremum. The traditional methods of regulation realized on the basis of the theory of the linear and linearized systems cannot ensure the demanded quality of regulation of the technological parameters of many industrial facilities, which are inherently nonlinear. There is a need for solution to the traditional problems of control with the use of the new methods implemented in smart systems, in particular, the neural network methods. The aim of the work is to solve the problem of an approximate assessment of the transition processes with the use of a neural network of perceptron type in coordinates, the exit time (z, t) of the control object, which gives a chance to construct an approximate assessment of the phase trajectory of the process in coordinates of the exit entrance (z, x) of the control object. For the solution of the problem of assessment of the dynamics of the exit of an object the neural network method is offered in the form of a three-layer network of perceptron type with a function of activation of the sigmoidal type. Use of the sigmoidal function allows us to transfer from the binary exits of neurons to the analog ones. The unknown parameters of a network result from the solution of the nonlinear optimizing problem of a minimal total error. The signal of an error of the solution of a neural network is defined as a difference between the desirable and valid output signals in the discrete time points. Results of the computing experiment of calculation of the transition process of search for the extremum of nonlinearity by a neural network method show efficiency of the offered neural network method in comparison with the known numerical methods of the solution of the differential equations, differing in considerable simplicity and rather high precision due to the choice of the number of neurons in the hidden layer, and also considerable speed.

Keywords: automatic optimization system, object control, nonlinearity-linearity, neural network method for solving of the nonlinear differential equations

For citation:

Demenkov N. P., Mochalov I. A. Neural Network Estimation of the Dynamics of the Automatic Optimization System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 659–663.

DOI: 10.17587/mau.16.659-663

References

1. Besekersky V. A., Popov E. P. *Teoria sistem avtomaticheskogo upravleniya* (The theory of automatic control systems), Moscow, Nauka, 1975 (in Russian).
2. Rastrigin L. A. *Sistemy ekstremal'nogo upravleniya* (Extreme control system), Moscow, Nauka, 1974 (in Russian).
3. Kazakevitch V. V., Rodov A. B. *Sistemy avtomaticheskoi optimizatsii* (System of automatic optimization), Moscow, Energy, 1977 (in Russian).

4. Pupkov K. A. ed. *Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* (Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control), Moscow, Publishing House of the Bauman MSTU, 2001 (in Russian).
5. Otadi M., Mosleh M. Numerical solution of quadratic Riccati differential equation by neural network, *Mathematical Sciences*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 249–257.
6. Buckley J. J., Feuring T. Fuzzy differential equations, *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, no. 11, pp. 43–54.
7. Buckley J. J., Feuring T. Introduction to fuzzy partial differential equations, *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, no. 5, pp. 241–248.
8. Komartsova L. G., Maximov A. V. *Neirokomp'yutery* (Neurocomputers), Moscow, Publishing House of the Bauman MSTU, 2004 (in Russian).
9. Galushkin A. I. Neural network technology in the promising supercomputers. The concept of high-performance computing based superneurocomputers (2012–2020 gg.), *Informatsionnye Tekhnologii*, 2013, no. 9, 32 p. (in Russian).

В. Ф. Головин, канд. техн. наук, зав. лаб. "Робототехника", medicalrobot@mail.ru,

М. В. Архипов, канд. техн. наук, доц.,

Московский государственный индустриальный Университет, Москва, Россия,

В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф., vpravl@mail.ru,

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины¹

Рассматриваются необходимость применения робототехнических систем для восстановительной медицины и особенности проектирования этих систем. Отмечается приоритет отечественных разработок в области аппаратных средств восстановительной медицины и рост интереса к ним в мире. Подробно описываются технические требования к параметрам и узлам робототехнической системы для восстановительной медицины: рабочей зоне, развиваемым усилиям, скоростям, точности, погрешности, системе управления, интерфейсу управления, инструментам. Отмечается, что при проектировании необходимо учитывать вопросы безопасности, экономической эффективности, взаимодействия робота и человека-пациента и психологического восприятия робота человеком-пациентом. Приводится пример технических требований к разработке робототехнической системы для восстановительной медицины. В заключении суммируются особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины.

Ключевые слова: робототехническая система, восстановительная медицина, биомехатронный модуль, технические требования, жизненный цикл, эргономика

Введение

Чтобы подчеркнуть актуальность и экономические преимущества использования робототехники для восстановительной медицины (ВМ), прежде всего необходимо отметить, что массаж и активные и пассивные движения конечностей в суставах являются проверенными тысячелетиями оздоровительными немедикаментозными средствами и что пока люди пользуются этими средствами в значительно меньшей степени, чем это им необходимо. Многие народы мира веками создавали культуры оздоровления, где ведущую роль и значение имели движение и соответствующие специализированные механические воздействия. К примеру, на Востоке для физической культуры характерно и имеет особое значение чередование нагрузений и разгрузок, концентраций и расслаблений, активного и пассивного отдыха. Для современного человека особенно актуальна такая физическая культура, для которой характерны не только активные волевые движения, но и пассивные движения, включая разнообразный массаж, постизометрическую релаксацию и другие приемы релаксации и мобилизации. Эффективными могут быть новые технологии совместного применения массажа, например, с мелотерапией, термотерапией, ароматерапией, активными движениями [5].

Сказанное приводит к выводу о необходимости создания специфических технических средств для

ВМ, на первый план при этом выходят вопросы создания и использования специализированных роботов.

Вообще проектированию технических систем посвящен ряд специальных работ, существуют ГОСТы на проектирование технических систем, известны конкретные примеры проектирования систем [1]. Подобная информация известна для медицинской техники [2] и робототехники [3, 4]. Основой проектирования как процесса является инновационная деятельность, когда кроме разработки проекта рассматривается доведение изделия до конкурентоспособного вида [1]. Проектирование робототехнических систем (РТС) для ВМ в основном следует принципам и методам проектирования технических систем, но имеет определенные особенности.

Особенности проектирования РТС для ВМ связаны, в первую очередь, с объектом управления — живыми биологическими мягкими тканями человека, их изменяющимися вязко-упругими свойствами, неинвазивным характером механического воздействия, а следовательно, с видами инструментов. Эти особенности проявляются в кинематике манипуляторов и построении их приводов.

Определим класс рассматриваемых далее РТС для ВМ. Это системы управляемого механического неинвазивного взаимодействия роботов с биологическими мягкими тканями (МТ) человека. Взаимодействия могут быть как непосредственными манипуляциями робота на МТ в виде разнообразного массажа [5] или перемещений датчиков вдоль тела пациента во время ультразвуковой диагностики [6], так и косвенными воздействиями, такими как дви-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-2511.2014.8.

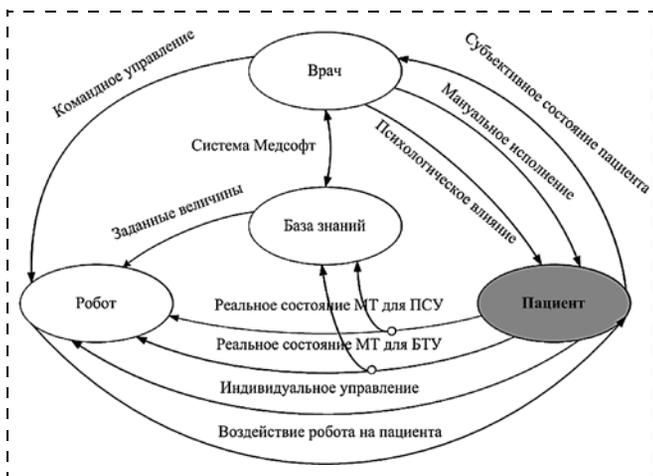


Рис. 1. Взаимодействие между компонентами эргатической системы "врач — робот — пациент"

жения конечностей человека (пациента) в суставах при взаимодействии их с роботом [5]. В основном далее будет рассматриваться проектирование РТС, выполняющих массажные воздействия. Отметим, что массаж, как один из основных элементов ВМ, является эффективным и широкодоступным средством восстановления работоспособности при физическом утомлении и надежным средством профилактики профессиональных заболеваний. Массаж утомленных мышц не только восстанавливает первоначальную мышечную работоспособность, но даже увеличивает ее. Повышение работоспособности утомленных мышц наблюдается и при массаже мышц, не принимавших участия в физической работе.

Предполагается, что РТС не только выполняют механические воздействия на пациента, но оценивают взаимодействие с биологическими МТ как объектами жизнедеятельности человека, диагностируя изменения психофизиологического состояния пациента и контролируя процесс [5]. Управление механическими взаимодействиями будет рассматриваться как реализация позиционно-силового управления (ПСУ), а управление психофизиологическим состоянием пациента — как биотехническое управление (БТУ). В целом управление РТС для ВМ является эргатическим в трехкомпонентной системе "врач — робот — пациент", причем пациент, в отличие от технического объекта, над которым проводит манипуляции робот, проявляет свои психофизиологические свойства (рис. 1) [7].

Характерными для проектирования технических систем являются два этапа НИР — разработка технического задания и предварительное проектирование, два этапа ОКР — эскизное и техническое проектирование, затем производство и эксплуатация. То же необходимо и в проектировании РТС для ВМ.

Основания для разработки РТС для ВМ

Направление разработки РТС для ВМ возникло как естественное развитие систем для замены трудо-

емкой работы массажистов и мануальных терапевтов при массовом обслуживании пациентов. Вместе с тем, русский врач Н. Б. Заблудовский [7] считал необходимым применение аппаратных средств массажа для дозирования массажных воздействий. В настоящее время появляются специализированные аппаратные средства (включая массажные кресла), которые, однако, значительно уступают возможностям человеческой руки [5]. Известны некоторые исследовательские разработки на Западе [3]. Как вывод можно отметить, что необходимы РТС для ВМ, спроектированные с учетом потребностей здравоохранения и возможностей современной робототехники. Государственного заказа на проектирование РТС для ВМ пока нет, но проводятся поисковые работы и создаются необходимые заделы.

Приоритет идеологии разработки универсальных медицинских роботов для ВМ принадлежит России. Существует патент на способ и устройство для выполнения массажа с применением манипуляционного робота [8].

Приведем несколько примеров. Наибольшую заинтересованность к работам по разработке роботов для массажа проявляют ученые из Китая, где методы массажной физиотерапии развиты значительно больше, чем на Западе. Учитывая скорость освоения новой техники и развития промышленного потенциала, можно предположить, что Китай может быть первым производителем роботов для массажа [13]. Такой робот разработан в Бейджинском технологическом институте (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Для совместной работы робота и человека, находящегося в рабочей зоне робота, немецкой компанией Kuka был разработан робот LWR (light weight robot), который по сравнению с другими, имеющими такую же рабочую зону, роботами имеет более легкую руку. При семи степенях подвижности и грузоподъемности, равной 7 кг, робот весит 22 кг. Робот может работать без ограждения, и при прикосновении к нему руки человека он мягко отводит свою руку в сторону [11] (рис. 3, а, см. вторую сторону обложки).

Такой же способностью безопасной работы без ограждения обладают роботы датской компании Universal Robots UR5 (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки) и UR10 [12].

Заметим, что в качестве конкурента манипуляционному роботу можно рассматривать уже упомянувшееся массажное кресло — безрукий робот, выполняющий приемы придавливающего массажа [9]. Массажные кресла имеют следующий ряд преимуществ перед манипуляционными роботами:

- большая концентрация необходимых движений в малом объеме рабочей зоны;
- посадка пациента в кресло гарантирует его ориентацию;
- большие усилия за счет малых рычагов в кресле.

Однако недостатки массажных кресел в сравнении с рукой робота существенные:

- меньшие мобильность и разнообразие движений;
- невозможность массажа передней поверхности тела пациента, в том числе лица;
- невозможность смещения точек при точечном массаже;
- невозможность хватных и царапательных приемов;
- невозможность выполнения движений конечностей в суставах;
- ограниченность применения инструментов для массажа.

Существует значительное разнообразие выпускаемых серийно массажных кресел, однако функционально уступающих манипуляционным роботам. Перечислим теперь требования к таким роботам.

Функциональные требования. Кинематика, приводы и инструменты манипуляторов для ВМ

Кинематические модели манипуляторов. Поскольку рассматривается класс РТС для ВМ, то технические требования к кинематике манипулятора определяются приближением манипулятора к человеческой руке массажиста или мануального терапевта. Из соображений бионического копирования человеческой руки уместны манипуляторы с ангулярной кинематикой.

Так как повышенной жесткости и точности роботов для ВМ не требуются, то кинематика руки манипулятора может быть последовательной, и нет необходимости прибегать к манипуляторам с параллельной структурой.

Для роботов, предназначенных для выполнения длинных продольных движений вдоль тела пациента (робот для шлейф-массажа [5]), уместной будет декартовая кинематика.

Гамма РТС для ВМ может охватывать манипуляторы с числом степеней подвижности от одного до семи. К одностепенным манипуляторам относятся простейшие специализированные, например, робот для капиллярного массажа головы, выполняющий поступательные движения в направлении оси инструмента [5].

Двухступенной манипулятор для шлейф-массажа выполняет цикловым способом управляемые движения вдоль тела пациента, прижимаясь пружиной к телу пациента.

Шестистепенные манипуляторы роботов, наиболее распространенных для технологических задач, позволяют в своей рабочей зоне выполнять пространственное позиционирование и ориентацию инструмента. Шестистепенной манипулятор используется как основа прототипа [9]. Однако обеспечение необходимой ориентации в любой точке рабочей зоны требует избыточности манипулятора. Семистепенной манипулятор использован в опытном образце робота для перемещения датчика при ультразвуковой диагностике [6].

Кинематика робота для выполнения движений конечностей в суставах может быть реализована на основе экзоскелетона, когда звенья робота накладываются на конечности пациента и оси суставов робота совпадают с осями суставов пациента. В других кинематических компоновках звенья робота могут располагаться как руки врача, находящегося напротив пациента [5].

Рабочая зона робота зависит не только от размеров участка, на котором выполняются процедуры. Для пациента могут быть необременительными некоторые установочные перемещения даже при использовании универсального робота. Рабочая зона робота может быть увеличена за счет применения подвижного стола, на котором находится пациент, в качестве одной из степеней подвижности робота.

Приводы робота. Чтобы обеспечить необходимые скорости и усилия, а также плавность перемещений, предпочтительно проектировать робот с электроприводами. Мощность электроприводов суставов должна быть в пределах 50...100 Вт. Чтобы обеспечить малую инерционность манипуляционной руки, следует располагать электродвигатели приводов не в звеньях манипулятора, а вместе с редукторами на подвижном основании. Связь приводов со звеньями в этом случае осуществляется легкими тросовыми передачами. Конструкции звеньев могут быть трубчатыми.

Для обеспечения плавности подхода инструмента робота к пациенту и мягкого взаимодействия с МТ привод силового модуля может быть пневматическим.

Инструменты манипуляторов. Так же как для любой робототехнической системы, исполнительные функции РТС для ВМ определяются инструментами, сменными или закрепляемыми на конечном звене манипулятора. Одним из отличительных требований, предъявляемых к инструментам медицинских роботов, является стерильность. Инструменты должны быть легкоъемными или автоматически заменяемыми с возможностью их стерилизации. Особое внимание этому уделяется в роботах для проведения хирургических и малоинвазивных операций, например в роботе Da Vinci [3]. Хотя РТС для ВМ выполняют неинвазивные процедуры, требования к стерильности сохраняются.

Основной особенностью медицинского робота для мануальной терапии и массажа является механический контакт робота с пациентом. Этот контакт осуществляется через инструмент. 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).

Одновременный контакт на большой поверхности тела может обеспечить многорукий робот или робот, имеющий две кисти или несколько пальцев. Возможно применение широкого эластичного, самоустанавливающегося инструмента. Это, в некоторой

степени, имитация работы нескольких массажистов. Также большая поверхность тела подвергается давлению при гидромассаже, например в джакузи. Однако для ряда техник необходима концентрация внимания в небольшой области тела, а поэтому достаточно одной руки и одного инструмента [5].

Примерно половину массажных приемов представляют нажимание на тело, а другую половину — действия с захватом и оттягиванием мягких тканей. Нажимные инструменты робота могут имитировать различные части рук и ног человека: подушечки большого пальца, ребра ладони, плоскости ладони.

В приемах точечного массажа большие значения удельных усилий — давлений — достигаются за счет малой контактной площади инструмента. Таким инструментом пользуется врач, такой же инструмент закрепляется на силовом модуле робота.

Приемы растирания, тракции с большим трением может выполнять инструмент с шершавой поверхностью, приемы с минимальным трением можно выполнять роликами или со смазкой, как в ароматерапии.

Контактную поверхность инструмента следует покрывать материалами со свойствами, близкими к человеческой коже. Определенная комфортность в контакте с человеческим телом может быть достигнута инструментом, подогреваемым током, например, с помощью резистора, вмонтированного в инструмент.

Часть приемов массажа и движений конечностей связана с захватыванием или участков мягких тканей, или конечностей. Среди массажных приемов это ординарное разминание, двойной гриф, двойное кольцевое зажимание. Инструмент робота для воспроизведения этих приемов может представлять двухпальцевый захват с контролем усилия прижатия пальцев, например, через программно устанавливаемое давление в пневмоцилиндре схвата.

Конкурентоспособность медицинского робота в сравнении с известными аппаратными средствами может быть достигнута за счет универсальности, многофункциональности, в том числе, за счет навешивания на робот в качестве инструмента серийно выпускаемых фирменных насадок. Это всевозможные вибраторы, ролики, игольчатые инструменты, оптические излучатели, диагностические приборы, например, по системе Фолля, измеряющие кожное сопротивление, и др. Все перечисленные насадки должны прижиматься силовым модулем робота к телу пациента с заданным усилием.

Технические требования к РТС для ВМ

Как правило, для технических систем требования охватывают габаритные размеры, массу, точность, надежность, энергопотребление [1]. Для РТС к этим требованиям добавляются следующие: кинематическая модель манипулятора, рабочая зона манипулятора, число степеней подвижности манипулятора, типы приводов манипулятора, развиваемые манипулятором усилия, скорости перемещения инструмента

манипулятора, способы управления манипулятором и системой управления РТС в целом, способы обучения. Специфическими требованиями к РТС для ВМ являются: развиваемые манипулятором усилия, число управляемых силовых компонент, погрешность воспроизведения силовых компонент, инструменты для взаимодействия с пациентом, вид диагностики психофизиологического состояния пациента, усиленные требования безопасности.

Далее рассмотрим технические характеристики, свойственные РТС для ВМ.

Задаваемые усилия. Значения задаваемых усилий зависят от вида процедуры и массогеометрических параметров пациента, его психофизиологического состояния. При выжимании и разминании мышц, например спортсменов, прикладывается усилие порядка 200...500 Н, при поглаживании усилие не должно превышать 1 Н. Погрешность воспроизведения заданных усилий при выполнении приемов общеукрепляющего гигиенического массажа может составлять 15... 30 % от задаваемых усилий.

Точность воспроизведения заданной траектории при заданном усилии может обеспечиваться существующими серийно выпускаемыми роботами, имеющими погрешность позиционирования $\pm 0,1$ мм. В этом случае для организации ПСУ достаточно модернизации программного обеспечения. В другом более дешевом варианте позиционный робот может иметь пониженную точность порядка $\pm 1,0$ мм.

Развиваемые скорости. Движения робота при выполнении процедур ВМ должны быть плавными, что требует контурного управления. Максимальные скорости движений руки при механотерапии не превышают 0,5 м/с. При выполнении релаксационных приемов, как правило, скорости меньше, чем при выполнении возбуждающих приемов.

Система управления. Для обеспечения наибольшей эффективности выполнения процедур ВМ необходима эргатическая система управления, учитывающая психофизиологические свойства пациента-человека. Чтобы обеспечить заданные усилия, перемещения и скорости, необходимо ПСУ с участием силового обучения, например, с использованием силового модуля.

Для реализации БТУ необходимы измерители параметров психофизиологического состояния — электрокожного сопротивления и мышечного тонуса, в которых в наибольшей степени проявляется действие механотерапии.

Интерфейс оператора. Необходимые усилия и скорости в первую очередь программно устанавливает и при необходимости изменяет врач, пользуясь опытом предыдущих сеансов с данным пациентом. Врач может пользоваться "советами" диагностической системы робота. На некоторых этапах отлаженных процедур врач может полностью доверять роботу, переключая его в автоматический режим работы. В автоматическом режиме робот поддерживает те усилия и скорости, которые рекомендует диагностический блок, анализирующий психофи-

зиологическое состояние пациента. Для удобства настройки и эксплуатации робота должен быть разработан эргономичный оконный интерфейс по аналогии с окнами программ в ОС MS Windows. Разработка интуитивно понятного интерфейса является задачей эргономики. Интерфейс должен предоставлять возможность пользователю в графическом режиме настраивать следующие параметры процедур: скорость выполнения, усилия взаимодействия, число повторений, переключение в автоматический режим работы и др. Необходимо предусмотреть вывод на монитор текущих и предыдущих параметров психофизиологического состояния. Пульт обучения и управления должен содержать элементы позиционного и силового обучения и управления роботом.

Пример технических требований при построении РТС для ВМ

Назначение: РТС предназначена для автоматического выполнения приемов оздоровительного массажа для населения в клиниках, фитнес-центрах, велнес-центрах, в домашних условиях.

Выполняемые приемы оздоровительного массажа: поглаживание, выжимание, разминание, растирание, зашипывание, вибрации с использованием сменных насадок-инструментов.

Состав комплекса: манипулятор, кушетка, набор сменных инструментов, пульт управления и обучения, электронный блок приводов, персональный компьютер с терминалом, блок биотехнического управления, блок пневмопитания.

Технические требования

Развиваемые манипулятором усилия	70 Н
Рабочая зона манипулятора	Сфера радиусом 1000—2000 мм
Число степеней подвижности манипулятора	6
Погрешность позиционирования манипулятора	0,1 мм
Макс. скорость инструмента	0,5 м/с
Масса руки манипулятора (без привода 1-го сустава)	3 кг
Приводы манипулятора	С тросовыми передачами, приводы 2...6 суставов установлены на подвижном основании, мощность электродвигателей: 1...3 суставов — 40 Вт, 4...6 суставов — 20 Вт
Датчик усилия	Трехкомпонентный
Инструменты	Набор сменных стерильных инструментов для каждого приема массажа
Управление робота	Позиционно-силовое и биотехническое
Обучение робота	С помощью силовых точек
Время проведения массажа	15...60 мин
Диагностика	По электро-кожному сопротивлению
Электропитание	220 В, 50 Гц
Требования безопасности	Повышенные
Программное обеспечение	Специализированное на базе современных операционных систем
Эргономика	Работа с учетом взаимодействия трех компонент эргатической системы

Условия эксплуатации

РТС имеет явные преимущества перед ручной человеческой работой как неутомимая система. Заменяя массажиста или мануального терапевта, РТС для ВМ должна обеспечивать непрерывную безотказную работу, такую же, как промышленные роботы, — по крайней мере 20 ч в сутки. Ресурс работы такой же, как у промышленных роботов.

Климатические условия эксплуатации определяются как домашние условия или условия стационаров клиник.

Безопасность робототехники для восстановительной медицины

В медицинской робототехнике требования к безопасности являются наиболее строгими, так как в большей степени относятся не к оператору, профессионально взаимодействующему с роботом, а к пациенту, который должен быть уверен, что о его безопасности позаботятся без его участия [5].

Наиболее опасной является инвазивная медицинская робототехника, например, хирургическая робототехника, где исполнительный элемент робота выполняет пункции, резекции по программным траекториям [3]. Здесь фатальной может быть ошибка на уровне составления программы или ошибка оператора при дистанционном проведении операции. В этом случае безопасность в большей степени зависит не от робота, а от мастерства, обученности оператора, на которого возлагается ответственность.

Структура робота содержит три контура с обратными связями по положению, усилию, биомедицинским переменным. Поэтому источниками опасных сбоев системы управления этого робота будут, в первую очередь, разрывы замыканий указанных контуров, отказы датчиков обратных связей. Другим источником опасных ситуаций может быть неправильная оценка задания параметров процедуры.

Возможными средствами предотвращения опасности могут быть следующие:

- 1) отключение приводов или отведение руки робота по сигналу датчика максимального усилия, который может подключаться через позиционно-силовую систему управления или непосредственно к питанию приводов;
- 2) отключение приводов или отведение руки робота по биомедицинским сигналам;
- 3) проверка приводов в начале процедур, а также силового датчика в программных контрольных точках;
- 4) выполнение первых движений с минимальными усилиями;
- 5) размещение двигателей приводов не в руке робота, а на платформе, что обеспечит малую инерционность и легкость руки;
- 6) мягкое неэлектропроводное покрытие руки и расположение на кисти и руке робота тактильных датчиков касания;

7) использование системы технического зрения для сравнения текущего изображения траектории инструмента с образцовым;

8) виртуальное планирование процедуры;

9) применение упругих суставов.

Необходимо выводить на монитор текущие значения механических и биомедицинских переменных и выделять область отклонений, предупреждающую звуковыми и световыми сигналами о подходе к зоне опасности.

Некоторые связи между компонентами системы образуют замкнутые петли (кольца). Поэтому необходимо обеспечить устойчивость этих контуров.

Рассмотренные требования обеспечения безопасности следует учитывать при разработке аппаратного интерфейса между врачом, пациентом и роботом, а также при разработке языка.

Если следовать бионическому подходу в проектировании роботов для ВМ, то, в первую очередь, следует стараться воспроизвести тактику врача и движения его рук при выполнении механотерапевтических процедур. Вместе с тем, робот может выполнять ряд новых приемов, несвойственных человеку.

При разработке первого универсального робота, выполняющего комплексы движений массажа и мануальной терапии, уместно в качестве основы воспользоваться серийно выпускаемыми роботами немедицинского назначения. Расширение сервиса, необходимого при обучении робота, а также повышение безопасности взаимодействия робота с врачом и особенно с пациентом на первых этапах разработки возможны с применением в качестве базового промышленных роботов типа UR-10 (стоимость робота €25.000) или Kuka LWR (стоимость робота €100.000).

При оценке стоимости работ на НИОКР по проекту "Робототехника для восстановительной медицины" можно выделить следующие особенности в порядке их значимости по этапам проектирования [14]:

- основанием для бюджетного финансирования разработки робота для ВМ является социально значимая проблема общества — поддержание здоровья населения;
- начало финансирования работ зависит от положительности экспертных оценок разработки робота в виде патентов, "ноу-хау";
- прототип робота с демонстрационными функциями может быть реализован на базе универсального робота немедицинского назначения и покупаемых датчиков (многокомпонентного силового, биомедицинских параметров);
- дальнейшие вложения в совершенствование товарного вида робота для ВМ превращают его в коммерческий продукт, который может быть предметом для перехода к передаче технологии на стадию производства.

Примеры разработки биомехатронных модулей РТС для ВМ и специализированных медицинских роботов для ВМ

В качестве возможных вариантов ниже рассматриваются примеры разработки биомехатронных силовых модулей РТС для ВМ и разработка специализированных медицинских роботов для ВМ. Эти исследования и разработки выполнены в Московском городском индустриальном университете.

Чтобы дополнять серийно выпускаемые роботы немедицинского назначения до роботов, выполняющих процедуры ВМ, предложен силовой биомехатронный модуль (рис. 4, см. вторую сторону обложки), содержащий датчик усилия, компенсатор и сменный инструмент [5].

Компенсатор необходим для демпфирования динамических перегрузок при взаимодействии робота с МТ пациента. Датчик усилия используется для позиционно-силового управления и как измеритель мышечного тонуса для диагностирования психофизиологического состояния пациента и БТУ.

В конструкции пассивного силового модуля механическая пружина выполняла роль компенсатора с постоянной податливостью. Для изменения податливости силового модуля и, следовательно, податливости манипулятора был предложен активный силовой биомехатронный модуль.

Конструкция активного силового модуля включает линейный привод, изменение коэффициента усиления которого вызывает изменение его податливости. Тензодатчик используется как чувствительный элемент систем позиционно-силового и биотехнического управления.

Многосуставный робот может выполнять массаж на нескольких участках тела и перемещать конечности вокруг нескольких осей. Значительно дешевле роботы с малым числом суставов, особенно одноприводные роботы, однако они обладают меньшими возможностями, могут обслуживать лишь отдельные участки и только определенные конечности вокруг одной оси. Остальные установочные движения выполняет пациент, перемещая новый участок тела в рабочую зону робота.

Несмотря на свою ограниченность, как автоматические приборы они будут более эффективны, чем распространенные аппаратные средства механизации. Эффективность таких роботов можно повысить при использовании в них диагностических средств, мехатронного подхода, ПСУ, БТУ, нестандартных датчиков и двигателей.

Возможные конструкции таких роботов описаны в монографии [5], примерами являются робот для косметического точечного массажа лица, робот с упругим проволочным инструментом для капиллярного массажа поверхности головы (рис. 5, см. вторую сторону обложки), робот для шлейф-массажа поверхности спины, робот-маятник для выжимания длинных мышц спины, робот для выполнения пассивных со стороны пациента движений руки в целях разработки контрактур.

Заклучение

Список литературы

РТС для ВМ в зависимости от задач представляют широкий класс, в котором универсальные и специализированные роботы входят как некоторые отдельные группы.

Развитие робототехники для ВМ в мире в настоящее время подтверждается серийными выпусками специализированных роботов для ВМ.

Основанием для бюджетного финансирования разработки РТС для ВМ является социально значимая проблема общества — поддержание здоровья населения.

Для РТС для ВМ требования безопасности в значительной степени решаются построением управления, позволяющего роботу работать без ограждения.

На первом этапе разработки РТС для ВМ в качестве базовых могут быть использованы импортные роботы немедицинского назначения Kuka LWR или UR-10.

Если в основу проектирования РТС для ВМ предлагается в качестве базового серийно выпускаемый робот, то основным аппаратным дополнением будет биомехатронный силовой модуль, необходимый и для ПСУ, и для БТУ.

Одним из дополнительных требований перспективного технического задания является разработка специальных автоматически заменяемых и стерильных инструментов.

Предложенные в статье требования к проектированию роботов для ВМ могут быть основой для составления технических заданий на разработку.

Для уточнения технического задания необходимо совместное участие в НИР технических и медицинских специалистов.

1. Юревич Е. И. Основы проектирования техники: учеб. пособие. СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001.
2. Лоццлов В. И., Шукин С. И. Принципы анализа и синтеза биотехнических систем. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987. 67 с.
3. Tavakoli M., Patel R. V., Moallem M., Aziminejad A. Haptics for teleoperated surgical robotic systems. Monograph series in the World scientific publishing under the title "New frontiers in robotics". Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003, 290 p.
4. Саврасов Г. В. Медицинская робототехника: состояние, проблемы и общие принципы проектирования // Вестник МГТУ им. Баумана Н. Э. Спецвыпуск "Биомедицинская техника и технология. Сер. "Приборостроение". 1998. С. 35—50.
5. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M. Robotics in Restorative Medicine. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012. 270 с
6. Golovin V., Arkhipov M., Juravlev V. Force Training for Position/Force Control of Message Robots. Mechanisms and Machine Science. New Trends in Medical and Service Robots. Springer International Publishing. Switzerland. 2014. Vol. 20. P. 95—109.
7. Заблудовский В. И. Материалы к вопросу о действии массажа на здоровых людей": дис. ... докт. мед. наук. СПб.: 1982. С. 33—37.
8. Головин В. Ф., Саморуков А. Е. Способ массажа и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2145833, 08.05.1998.
9. Массажные кресла. URL: <http://www.discountleatherchair.com/osaki-massage-recliners.html> (дата обращения: 22.01.2015).
10. Массажеры для головы и тела. URL: <http://www.massagerell.ru> (дата обращения: 22.01.2015).
11. Роботы Kuka. URL: http://www.kuka-labs.com/en/medical_robotics/lightweight_robotics/ (дата обращения: 22.01.2015).
12. Роботы UR. URL: <http://fam-robotics.ru/product/ur5> (дата обращения: 22.01.2015).
13. Робот для массажа Бейджингского технологического института. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=8LBFUaylbnc&t=40> (дата обращения: 22.01.2015).
14. Колобов А. А., Кочетов В. В., Омельченко И. Н. и др. Экономика инновационной деятельности наукоемких предприятий. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. 383 с.

Specific Features of Designing of the Robotic Systems for the Restorative Medicine

V. F. Golovin, medicalrobot@mail.ru✉, M. V. Arkhipov,

Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation,

V. E. Pavlovskiy, vlpavl@mail.ru, Institute of Applied Mathematics, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Golovin Vadim F., Chief of Robotics Laboratory, Moscow State Industrial University, Moscow, 115280, Russian Federation, e-mail: medicalrobot@mail.ru

Received on April 30, 2015

Accepted on May 15, 2015

The topic of this article is the role of the robotic systems in the restorative medicine and specific features of designing of such systems. The authors note the priority of the domestic developments in the area of the restorative medicine and the growing interest to them in the world. The specific features of the design of robotic systems for the restorative medicine are connected, first of all, with the live biological human soft tissues, their variable viscous-elastic properties, non-invasive nature of the mechanical influence, and various tools. Presently the robotic systems appear, which encourages development of the service systems of the public health care. The theoretical value of the work consists in presentation of the robotic systems for the restorative medicine with three components of the ergotic system, of which two components — physician and patient — are not technical objects but live intelligent subsystems. In this work the technical requirements for the parameters and units of the robotic systems for the restorative medicine are described, including the working area, developed efforts, speeds, accuracy, control systems, interface and tools. It is necessary to take into account the problems of safety, economic efficiency, interaction of robots and human-patients. The authors provide examples of technical requirements to the development of the robotic systems for the restorative medicine. In conclusion, they summarize the specific features of the robotic systems for the restorative medicine.

Keywords: robotic system, restorative medicine, bio-mechatronic modules, technical requirements, life cycle, ergonomics

Acknowledgements: This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-2511.2014.8

For citation:

Golovin V., Arhipov M., Pavlovskiy V. Specific Features of Designing of the Robotic Systems for the Restorative Medicine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 664–671.

DOI: 10.17587/mau.16.664-671

References

1. **Jurevich E. I.** *Osnovy proektirovaniya tehniki* (Basics of technical systems designing), SPb., Publishing house of SPbGTU, 2001 (in Russian).
2. **Loshhilov V. I., Shukin S. I.** *Principy analiza i sinteza biotekhnicheskikh sistem* (The principles of analysis and synthesis of biotechnical systems), Mocsow, Publishing house of MVTU im. N. Je. Baumana, 1987, 67 p. (in Russian).
3. **Tavakoli M., Patel R. V., Moallem M., Aziminejad A.** Haptics for teleoperated surgical robotic systems, Monograph series in the World scientific publishing under the title "New frontiers in robotics", Singapore, World Scientific Publishing Company, 2003, 290 p.
4. **Savrasov G. V.** *Medicinskaja robototekhnika: sostojanie, problemy i obshhie principy proektirovaniya* (Medical robotics: state, problems and general design principles), *Vestnik MGTU im. Baumana N. Je., Specvyпуск "Biomedicinskaja Tehnika i Tehnologija, Ser. "Priborostroenie"*, 1998 (in Russian).
5. **Golovin V. F., Zhuravlev V. E., Arhipov M. V.** Robotics in Restorative Medicine, LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012, 270 c.

6. **Golovin V. F., Arhipov M. V., Zhuravlev V. E.** Force Training for Position/Force Control of Message Robots. Mechanisms and Machine Science, New Trends in Medical and Service Robots, Springer International Publishing, Switzerland, 2014, vol. 20, pp. 95–109.

7. **Zabludovskij V. I.** *Materialy k voprosu o dejstvii massazha na zdorovyh ljudej* (Materials for the issue of the effect of massage for healthy people), Phd theses, SPb., 1882 (in Russian).

8. **Golovin V. F., Samorukov A. E.** *Sposob massazha i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija* (Massage method and device for its implementation), Ros.patent № 2145833 ot 08.05.1998 (in Russian).

9. **Massazhnye kresla** (Massage Chairs), available at: <http://www.discountleatherchair.com/osaki-massage-recliners.html> (data of access: 22.01.2015).

10. **Massazhery dlja golovy i tela** (Massage for the head and the body), available at: <http://www.massagerell.ru> (data of access: 22.01.2015).

11. **Roboty Kuka** (Robots Kuka), available at: http://www.kukalabs.com/en/medical_robotics/lightweight_robotics/ (data of access: 22.01.2015).

12. **Robots UR**, available at: <http://fam-robotics.ru/product/ur5> (data of access: 22.01.2015).

13. **Robot dlja massazha Bejdzhingskogo tehnologicheskogo institute** (Robot massage Bejdzhing Institute of Technology), available at: <http://www.youtube.com/watch?v=8LBFUaylbcn#t=40> (data of access: 22.01.2015).

14. **Kolobov A. A., Kochetov V. V., Omel'chenko I. N.** *Jekonomika innovacionnoj dejatel'nosti naukoemkih predpriyatij* (The economy of innovation high-tech enter), Moscow, Publishing house of MGTU im. Baumana, 2007 (in Russian).

УДК 621.865.8

DOI: 10.17587/mau.16.671-678

Д. Р. Богданов, науч. сотр., dr_bog@mail.ru, **О. В. Даринцев**, д-р техн. наук, зав. лаб., ovd@uimech.org,
Институт механики им. П. П. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, г. Уфа

Кинематика манипулятора с управляемым изгибом на базе твердых элементов со сферической поверхностью

Рассматривается новый класс манипуляторов, построенных на базе звеньев с управляемым изгибом, формируемых из твердых элементов со сферической поверхностью. Описана методика построения полной кинематической модели звена подобного манипулятора. Приводятся результаты компьютерного моделирования движения манипулятора (прямая задача кинематики), построенного на базе одного, двух, трех и четырех звеньев, которые подтверждают адекватность построенных математических моделей с учетом принятых допущений. Получено решение обратной задачи кинематики для рабочей точки звена с учетом его положения в рабочем пространстве.

Ключевые слова: манипулятор с управляемым изгибом, кинематика, кинематический анализ, прямая и обратная задачи

Введение

В последнее время значительно расширяются области применения роботов. Так, ускорились работы в сервисной и социальной робототехнике, отмечается увеличение числа тем по роботам двойного назначения, не осталась без внимания исследователей также тема спецтехники. Общей чертой вышеперечисленных направлений является необходимость разработки новых манипуляционных схем, лишенных основного недостатка промышленных манипуляторов — жесткости конструкции. Одним из представителей семейства нетипичных конструкций манипуляторов являются плоские и пространственные механизмы, постро-

енные на базе звеньев с управляемым изгибом [1]. Пример одного из последних на сегодняшний день решений по созданию такого манипулятора можно увидеть в работе зарубежных ученых [2]. Вопросы управления подобными манипуляторами освещены в отечественной и зарубежной литературе не в полной мере, так как синтез систем управления достаточно сложен и обусловлен многообразием конструкторских решений таких манипуляторов, специфичностью базовых перемещений и средств их реализации. Особый интерес представляет использование гибких манипуляторов в микроробототехнике, но такой вариант использования еще более усложняет проблему синтеза, поскольку значительно увеличивается возмущающее воздействие среды на

манипулятор, в частности, таких параметров, как влажность, температура, адгезия поверхности, вязкость смазывающих материалов и т. д. [3].

Для построения систем управления нетипичными манипуляторами, учитывающих специфику их конструкций, необходимы точные решения как прямых, так и обратных задач кинематики и динамики, выбор оптимальной архитектуры информационной системы, подбор приводов и т. д. Большая часть специфических конструкций управляется дистанционно, в случае использования автоматизированной системы отработки заданных движений используется режим обучения (повтора).

В данной статье авторы предлагают свое решение задач кинематики манипулятора, который, в отличие от известных промышленных вариантов, строится на базе бесшарнирного соединения компонентов [1]. Основные проблемы при поиске решений были связаны с тем, что при перемещении манипулятора происходит сложное взаимное движение компонентов звена — твердых элементов со сферической рабочей поверхностью, траектории дендров координат которых описываются уравнениями эпитроихиды [4]. Рассмотрены различные варианты прямой и обратной задач кинематики для плоского (2D) и пространственного (3D) движений звена. Результат модельных экспериментов показан в виде трансформации формы звена при изменении длин силовых тросов. Сформулированы и рассмотрены проблемы создания динамической модели звена с управляемым изгибом, выявлены основные виды нелинейностей при управлении манипулятором. Анализ динамики, выбор информационной системы, синтез системы управления частично обсуждаются в других работах авторов [5, 6] и на настоящий момент находятся в процессе теоретических исследований, экспериментальной апробации, верификации параметров модели и выбора оптимальной формы реализации с учетом требования работы в режиме реального времени.

Геометрия звена манипулятора с управляемым изгибом

Звено манипулятора с управляемым изгибом представляет собой набор из n подвижных элементов с контактирующими поверхностями, которые являются частями сфер радиусом R . При этом точка контакта элементов звена двигается по поверхности, а движение центров систем координат элементов описывается уравнением эпитроихиды. Поэтому стандартные подходы для описания положения манипулятора в пространстве неприменимы, так как они подразумевают использование кинематических пар 5-го класса или наличие шарнирных соединений в сочленениях манипулятора. Так, для решения поставленных задач принималось, что верхний элемент звена неподвижный, остальные элементы подвешены на четырех тросах, проходящих через сквозные отверстия [1]. Без учета влияния внешних

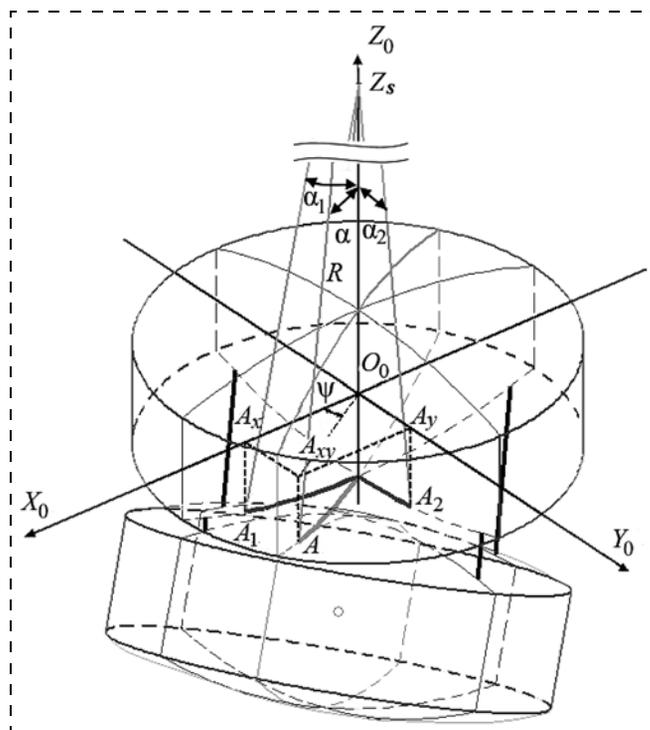


Рис. 1. Неподвижный и подвижный элементы звена

сил при идентичности характеристик поверхности принимается, что движение любых других элементов звена друг относительно друга происходит согласно рассматриваемому ниже движению первой пары элементов звена: верхнего неподвижного и следующего за ним нижнего подвижного (рис. 1).

Верхнему неподвижному элементу, который будет являться точкой отсчета, присваивается индекс "ноль" (или элемент "0"). Тогда положение подвижного элемента в пространстве при идентичности параметров поверхности (единый для всех элементов радиус сферической образующей R) описывается углом α между осью O_0Z_0 и прямой, проходящей через точку контакта элементов 0 и 1 звена (точка A на рис. 1) и центр сферы, частью которой является нижняя поверхность элемента 0 (точка Z_s), и углом ψ между радиус-вектором из т. O_0 в проекцию A_{xy} точки контакта A на плоскость $X_0O_0Y_0$ и положительным направлением оси O_0X_0 .

Прямая задача кинематики

Для решения прямой задачи кинематики необходимо найти углы α и ψ при заданном изменении обобщенных координат — длин тросов, сформировать однородную матрицу преобразований и затем с ее помощью вычислить координаты рабочей точки последнего элемента звена. Были рассмотрены два варианта решения задачи: плоский, когда в перемещении ведущим является только один трос, длина которого уменьшается при формировании изгиба звена, и общий случай, когда ведущими является пара тросов. Отрезок ведущего троса для одной пары элементов, который определяется как расстояние

между точками выхода его из сквозных отверстий в верхнем и нижнем элементах, обозначим как $L_{\text{ведущ}}$, отрезок ведомого (противофазного) троса для одной пары элементов обозначим $L_{\text{ведом}}$. Для решения плоской задачи рассмотрим движение элементов друг относительно друга в плоскости $X_0O_0Z_0$ (рис. 2, а).

Длины $L_{\text{ведущ}}$ и $L_{\text{ведом}}$ могут быть вычислены через значение угла α :

$$\begin{aligned} L_{\text{ведущ}} &= 2R(1 - \cos(\alpha_m - \alpha)), \\ L_{\text{ведом}} &= 2R(1 - \cos(\alpha_m + \alpha)), \end{aligned}$$

где α_m — максимальный угол отклонения нижнего элемента, значение которого зависит от радиуса сфер R , образующих поверхности качения элементов, и диаметра окружности d , на которой лежат сквозные

отверстия: $\alpha_m = \arcsin\left[\frac{d}{2R}\right]$. Этот конст-

руктивный параметр также определяет "начальную" длину отрезков $L_{\text{ведущ}}$ и $L_{\text{ведом}}$ при значении $\alpha = 0$, $L_0 = 2R(1 - \cos\alpha_m)$.

Тогда изменение длины ведущего троса, при котором происходит изгиб звена на угол α , можно выразить как

$$\Delta L_{\text{ведущ}} = L_0 - L_{\text{ведущ}} = L_0 - 2R(1 - \cos(\alpha_m - \alpha)). \quad (1)$$

Отсюда находим искомый угол:

$$\alpha = \alpha_m - \arccos\left[1 - \frac{L_0 - \Delta L_{\text{ведущ}}}{2R}\right]. \quad (2)$$

Зная угол α , можно вычислить изменение (увеличение) длины противофазного троса по следующей формуле:

$$\Delta L_{\text{ведом}} = L_{\text{ведом}} - L_0 = 2R(1 - \cos(\alpha_m + \alpha)) - L_0. \quad (3)$$

Для звена манипулятора, состоящего из n подвижных элементов, рассмотрим два возможных варианта работы тросов — "объемную" и "плоскую" задачи.

Вариант 1. В этом случае изгиб звена формируется за счет задания изменения длин двух ведущих тросов. Считаем, что для нормальной работы звена натяжение тросов должно обеспечивать постоянный контакт элементов между собой, движение самого нижнего элемента можно рассматривать как суперпозицию движений элементов звена при изменении длин ведущих тросов $\Delta L_{\text{ведущ}1n}$ и $\Delta L_{\text{ведущ}2n}$ для всех n подвижных элементов. Отсюда перемещение ведущих тросов для одной пары элементов будет следующим:

$$\Delta L_{\text{ведущ}1} = \frac{\Delta L_{\text{ведущ}1n}}{n}, \quad \Delta L_{\text{ведущ}2} = \frac{\Delta L_{\text{ведущ}2n}}{n}.$$

Из рис. 1 видно, что углу изгиба звена α соответствует дуга OA на нижней поверхности верхнего элемента звена. Проекцией дуги OA на плоскость $X_0O_0Y_0$ является вектор O_0A_{xy} , который можно разложить на проекции по осям O_0X_0 и O_0Y_0 : A_x и A_y .

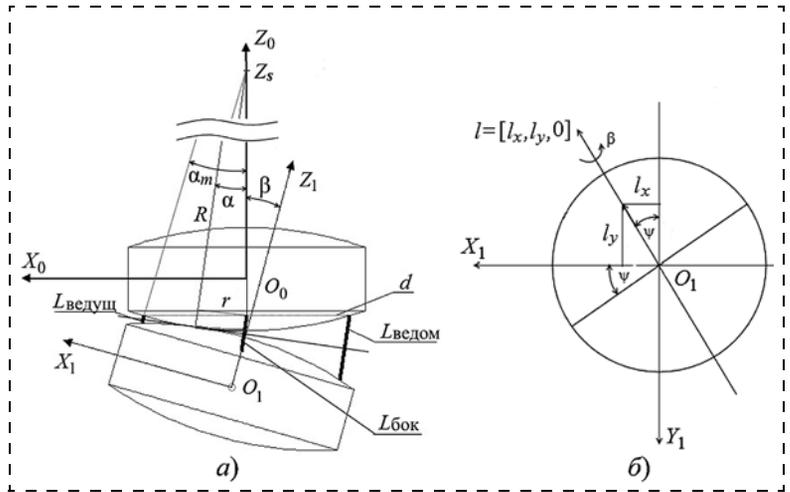


Рис. 2. Движение элементов звена в одной плоскости (а); ориентация подвижного элемента звена (б)

Этим проекциям соответствуют дуги на нижней поверхности этого элемента OA_1 и OA_2 , которые определяются радиусом R и углами α_1 и α_2 . Эти углы, в свою очередь, обеспечиваются соотношением изменений тросов $\Delta L_{\text{ведущ}1}$, $\Delta L_{\text{ведом}1}$ и $\Delta L_{\text{ведущ}2}$, $\Delta L_{\text{ведом}2}$ соответственно.

Исходя из этого при изменении каждого из ведущих тросов сначала определяются отдельно углы α_1 и α_2 по формуле (2). Затем вычисляются изменения ведомых тросов $\Delta L_{\text{ведом}1}$ и $\Delta L_{\text{ведом}2}$ по формуле (3). Для звена с n подвижными элементами изменения длин ведомых тросов для всего звена будут следующие:

$$\Delta L_{\text{ведом}1n} = \sum_{i=1}^n \Delta L_{\text{ведом}1}^i, \quad \Delta L_{\text{ведом}2n} = \sum_{i=1}^n \Delta L_{\text{ведом}2}^i,$$

или, если движение всех элементов друг относительно друга происходит идентично,

$$\Delta L_{\text{ведом}1n} = n\Delta L_{\text{ведом}1}, \quad \Delta L_{\text{ведом}2n} = n\Delta L_{\text{ведом}2}.$$

Результирующий угол изгиба для одного элемента звена α определяется следующим образом:

$$\alpha = \arcsin\left[\frac{a}{R}\right].$$

где a — хорда дуги OA .

Хорда a , в свою очередь, вычисляется как

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2},$$

где a_1 и a_2 — хорды дуг OA_1 и OA_2 . Они определяются следующим образом: $a_1 = R\sin\alpha_1$, $a_2 = R\sin\alpha_2$.

Из этого выражения следует, что:

$$\alpha = \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\alpha_1 + \sin^2\alpha_2}\right).$$

Для звена из n подвижных элементов угол изгиба звена определяется как $\alpha^n = \sum_{i=1}^n \alpha_i$. Если движения элементов идентичны: $\alpha^n = n\alpha$.

Угол ψ , как видно из рис. 1, вычисляется по формуле:

$$\psi = \arctg\left(\frac{a_1}{a_2}\right) + \frac{\pi}{2}k = \arctg\left(\frac{\sin a_1}{\sin a_2}\right) + \frac{\pi}{2}k, \quad k = 0, 1, 2, 3,$$

где значение k зависит от того, какие тросы являются ведущими. Обозначим l_{XP} трос, проходящий через отверстие, лежащее на оси O_0X_0 . Тросы, проходящие через отверстия на осях O_0Y_0 , $-O_0X_0$ и $-O_0Y_0$, обозначим соответственно l_{YP} , l_{XN} и l_{YN} . Тогда k будет определяться следующим образом:

- 1) $k = 0$, если ведущие тросы l_{XP} и l_{YP} ;
- 2) $k = 1$, если ведущие тросы l_{YP} и l_{XN} ;
- 3) $k = 2$, если ведущие тросы l_{XN} и l_{YN} ;
- 4) $k = 3$, если ведущие тросы l_{YN} и l_{XP} .

Вариант 2. Ведущим является только один трос.

Решение задачи упрощается, так как угол ψ будет принимать только четыре значения в зависимости от того, какой трос является ведущим. Если ведущий трос l_{XP} , тогда $\psi = 0^\circ$, если l_{YP} , то $\psi = 90^\circ$ и т. д. Остается найти угол α , используя формулу (2) и учитывая, что звено состоит из n подвижных элементов, как это было сделано в варианте 1.

Затем по найденному углу α вычисляется значение изменения длины ведомого троса $\Delta L_{\text{ведом}}$ по формуле (3). Тросы $L_{\text{бок}}$ в перпендикулярной, по отношению к ведущему и ведомому тросам, плоскости также участвуют в перемещении, их можно отнести к ведомым. Изменения длин этих тросов одинаковы, а значения, согласно рис. 2, могут быть вычислены по следующей формуле:

$$L_{\text{бок}} = 2(R - r \cos \alpha),$$

где $r = \sqrt{R^2 - \left[\frac{d}{2}\right]^2}$ — расстояние от центра обрабатываемой сферы до точки выхода троса.

Тогда изменение длины боковых тросов для пары элементов может быть вычислено как

$$\Delta L_{\text{бок}} = 2r(1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

Для звена с n подвижными элементами изменения длин боковых тросов вычисляются аналогично процедурам получения значений для ведомых или ведущих тросов.

Для построения компьютерной модели на основе полученных выше решений была выведена однородная матрица преобразований, с помощью которой рассчитывалось положение любой точки звена в пространстве и ориентация соответствующего сегмента. В качестве базовой системы координат манипулятора взята система $X_0Y_0Z_0$, центр которой совпадает с центром верхнего неподвижного элемента O_0 . Движение подвижного элемента раскладывается на две составляющие: поворот элемента вокруг единичного вектора $l = [l_x, l_y, l_z]^T$, проходящего через центр координат O_1 элемента, и перемещение самого центра O_1 относительно начала системы координат O_0 .

Единичный вектор поворота, как видно из рис. 2, б, лежит в плоскости $X_1O_1Y_1$, его нормализованный вид при произвольном значении угла ψ будет следующим: $l = [\sin \psi, -\cos \psi, 0]^T$.

Поворот подвижного элемента на угол β относительно полученного вектора рассчитывается через угол наклона α и при равенстве радиусов сфер, образующих рабочие поверхности элементов, будет равен $\beta = 2\alpha$. Тогда ориентацию системы координат $X_1Y_1Z_1$ можно описать с помощью матрицы поворота $R_{l, \beta}$, для вычисления которой используется известная формула [7]. Компоненты этой матрицы, а значит, и ориентация элемента в пространстве зависят от значений углов ψ и $\beta(\alpha)$: $R_{11} = \sin^2 \psi (1 - \cos \beta) + \cos \beta$, $R_{12} = -\sin \psi \cos \psi (1 - \cos \beta)$ и т. д.

Текущее положение центра подвижного элемента O_1 относительно начала системы координат O_0 является следствием его перемещения по эпициклоиде, и ее траектория задается системой параметрических уравнений [4]:

$$\begin{cases} p_{1x} = (2R \sin(\alpha + \alpha_0) - (R - h_0) \sin(2\alpha + \alpha_0)) \cos \psi; \\ p_{1y} = (2R \sin(\alpha + \alpha_0) - (R - h_0) \sin(2\alpha + \alpha_0)) \sin \psi; \\ p_{1z} = 2R \cos(\alpha + \alpha_0) - (R - h_0) \cos(2\alpha + \alpha_0) + (R - h_0), \end{cases} \quad (5)$$

где α_0 — угол относительно оси Z_1 , с которого начинается движение подвижного элемента звена; для рассматриваемого нами варианта $\alpha_0 = \pi$; h_0 — расстояние центра координат O_1 от поверхности сферы.

Полученный вектор перемещения $p_{1\alpha, \psi} = [p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}]^T$ и матрица поворота $R_{l, \beta}$ формируют однородную матрицу преобразований для пары элементов, которая при принятых выше допущениях используется для вычисления координат и ориентации последнего элемента звена, состоящего из n подвижных элементов:

$$T_n = \prod_{i=1}^n \begin{vmatrix} R_{l, \beta}^i & p_{\alpha, \psi}^i \\ 000 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Полученное решение прямой задачи кинематики (6) отличается от экспериментальных результатов в силу принятых допущений, и, в первую очередь, это связано с тем, что при решении кинематических задач не учитываются следующие динамические процессы в сугубо нелинейной системе:

- 1) растяжение тросов при изменении нагрузки;
- 2) нелинейность в момент начала движения элементов: переход от трения покоя к трению качения (значения этих сил трения для металлов различаются на порядок [8]). Вследствие этого элементы звена приходят в движение последовательно и скачкообразно, с некоторой временной задержкой, начиная с последнего элемента.

Вышеперечисленные причины рассогласования модельных и экспериментальных данных могут быть учтены только при реализации динамической модели, при построении которой будут использо-

ваны данные, полученные с датчиков положений, установленных на некоторых подвижных элементах звена.

Обратная задача кинематики

Обратная задача кинематики заключается в определении необходимых значений обобщенных координат манипулятора для достижения требуемых координат рабочей точки манипулятора в рабочем пространстве. Обозначим исходные координаты рабочей точки как $p_t = [p_{xt}, p_{yt}, p_{zt}]^T$. Эта точка лежит на нормали к центру нижней поверхности последнего подвижного элемента на расстоянии L_t .

В зависимости от положения центра координат последнего элемента звена p_{nz} относительно плоскости основания $X_0O_0Y_0$ есть два решения обратной задачи.

1. Значение координаты $p_{nz} \leq 0$.

Рассмотрим решение обратной задачи для однозвенного манипулятора с четырьмя подвижными элементами (рис. 3). Для упрощения рисунка звено изображено для значения угла $\psi = 0$.

Решение обратной задачи начинается с последнего подвижного звена манипулятора, имеющего координаты $p_4 = [p_{4x}, p_{4y}, p_{4z}]^T$. Вектор p_4 образует с осью Z_0 угол G , который вычисляется как сумма углов γ , образованных отрезками $p_i - p_{i-1}$ с осями Z_{i-1} , где i — номер подвижного элемента звена, т. е. в данном случае $G = 4\gamma$. Решая геометрическую задачу, находим значение угла G : $G = \arctg \frac{\sqrt{p_{4x}^2 + p_{4y}^2}}{p_{4z}}$.

$$\text{Следовательно, } \gamma = G/4 = \arctg \frac{\sqrt{p_{x4}^2 + p_{y4}^2}}{p_{z4}} / 4.$$

Через координаты точки p_1 выразим угол γ :

$$\text{tg } \gamma = \frac{\sqrt{p_{x1}^2 + p_{y1}^2}}{p_{z1}}.$$

С учетом системы уравнений (5) и $\alpha_0 = \pi$ запишем:

$$\text{tg } \gamma = \frac{\sqrt{((-2R \sin \alpha + (R - h_0) \sin 2\alpha) \cos \psi)^2 + ((-2R \sin \alpha + (R - h_0) \sin 2\alpha) \sin \psi)^2}}{-2R \cos \alpha + (R - h_0)(\cos 2\alpha + 1)}.$$

После элементарных преобразований получаем, что $\text{tg } \gamma = \text{tg } \alpha$, или $\gamma = \alpha$. Отсюда

$$\alpha = \arctg \frac{\sqrt{p_{x4}^2 + p_{y4}^2}}{p_{z4}} / 4,$$

или для n элементов

$$\alpha = \arctg \frac{\sqrt{p_{xn}^2 + p_{yn}^2}}{p_{zn}} / n. \quad (7)$$

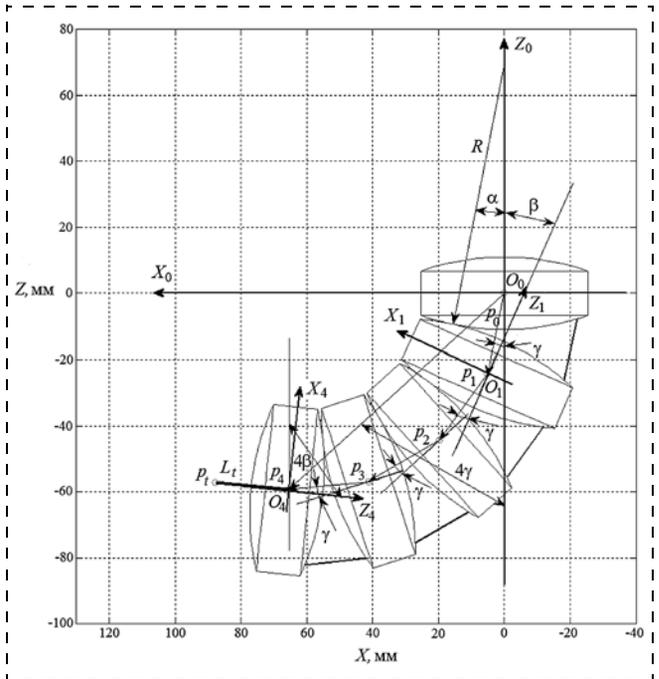


Рис. 3. Звено манипулятора из четырех элементов

Значение угла ψ , где $\psi \in [0^\circ, 360^\circ)$, для n элементов вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} \psi = \arctg \frac{p_{ty}}{p_{nx}} & \text{при } p_{4x} \neq 0; \\ \psi = 90^\circ & \text{при } p_{nx} = 0, p_{ny} > 0; \\ \psi = -90^\circ & \text{при } p_{nx} = 0, p_{ny} < 0. \end{cases} \quad (8)$$

По полученным значениям углов α и ψ можно вычислить перемещения тросов, при которых центр последнего подвижного звена манипулятора выйдет в требуемое положение в пространстве.

Если в качестве требуемых координат задано положение рабочей точки p_t , лежащей на оси Z_n , тогда координаты точки p_n определяются через координаты точки p_t и расстояния между ними L_t . В результате соотношения (7) и (8) после несложных геометрических преобразований приобретут следующий вид:

$$\alpha = \left| \arctg \frac{\sqrt{p_{xt}^2 + p_{yt}^2}}{(p_{zt} - L_t)} \right| / n; \quad (9)$$

$$\begin{cases} \psi = \arctg \frac{p_{ty}}{p_{tx}} & \text{при } p_{4x} \neq 0; \\ \psi = 90^\circ & \text{при } p_{tx} = 0, p_{ty} > 0; \\ \psi = -90^\circ & \text{при } p_{tx} = 0, p_{ty} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

2. Значение координаты $p_{nz} > 0$.

Такая ситуация возможна при определенном числе подвижных элементов звена n и соблюдении условия $\alpha_m \geq \alpha > \frac{90^\circ}{n}$. В этом случае при определенных допустимых значениях угла α центр последнего элемента находится выше плоскости $O_0X_0Y_0$ (рис. 4).

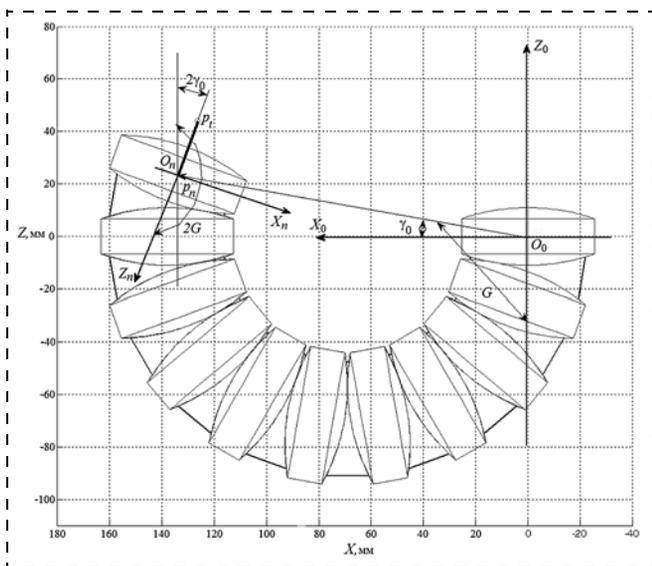


Рис. 4. Звено манипулятора из десяти элементов

Значение n зависит от целого ряда конструктивных параметров элементов звена: радиусов образующих сфер, толщины и диаметра элементов, значения максимального угла α_m . Для тех значений параметров, что использованы при изготовлении лабораторного стенда, такая конфигурация возможна для манипулятора с десятью подвижными элементами

при значении угла изгиба $\alpha > 9^\circ$ (рис. 4). Тогда по координатам центра n -го элемента звена p_n и с учетом представления угла $G = \frac{\pi}{2} + \gamma_0$ можно записать следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \gamma_0 = \left| \frac{p_{zn}}{\sqrt{p_{xn}^2 + p_{yn}^2}} \right|.$$

Если в качестве требуемых координат задано положение рабочей точки звена, тогда аналогично рассмотренному выше варианту выразим координаты точки p_n через координаты известной точки p_t и с учетом того, что $G = \frac{\pi}{2} + \gamma_0$, получим следующие выражения:

$$G = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{(p_{zt} - L_t)}{\sqrt{p_{xt}^2 + p_{yt}^2}},$$

$$\alpha = \gamma = |G|/n = \left[\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{(p_{zt} - L_t)}{\sqrt{p_{xt}^2 + p_{yt}^2}} \right] / n.$$

Для этого варианта расчеты угла ψ ведутся также на основании системы уравнений (10).

Далее, для определения того, какой из тросов будет ведомым или ведущим, а также для вычисления необходимых изменений длины тросов, необходимо применить следующий алгоритм:

1. По значениям углов α и ψ определяем углы α_1 и α_2 , соответствующие ведущим и ведомым тросам, по следующим формулам:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{a \cos \psi}{R}\right),$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{a \sin \psi}{R}\right).$$

2. По вычисленному значению угла ψ определяем ведущие и ведомые тросы, и по формулам (1)–(3) вычисляем целевые значения, которые должны обработать приводы перемещения тросов.

Например, при $\psi \in (0^\circ, 90^\circ)$ ведущими тросами являются l_{XP} и l_{YP} , ведомыми — l_{XN} и l_{YN} . Требуемые изменения их длины вычисляются следующим образом:

$$\Delta L_{XP} = [L_0 - 2R(1 - \cos(\alpha_m - \alpha_1))]n;$$

$$\Delta L_{YP} = [L_0 - 2R(1 - \cos(\alpha_m - \alpha_2))]n;$$

$$\Delta L_{XN} = [L_0 - 2R(1 - \cos(\alpha_m + \alpha_1))]n;$$

$$\Delta L_{YN} = [L_0 - 2R(1 - \cos(\alpha_m + \alpha_2))]n.$$

На основе полученной кинематической модели было выполнено компьютерное моделирование конфигурации манипуляторов с различным чис-

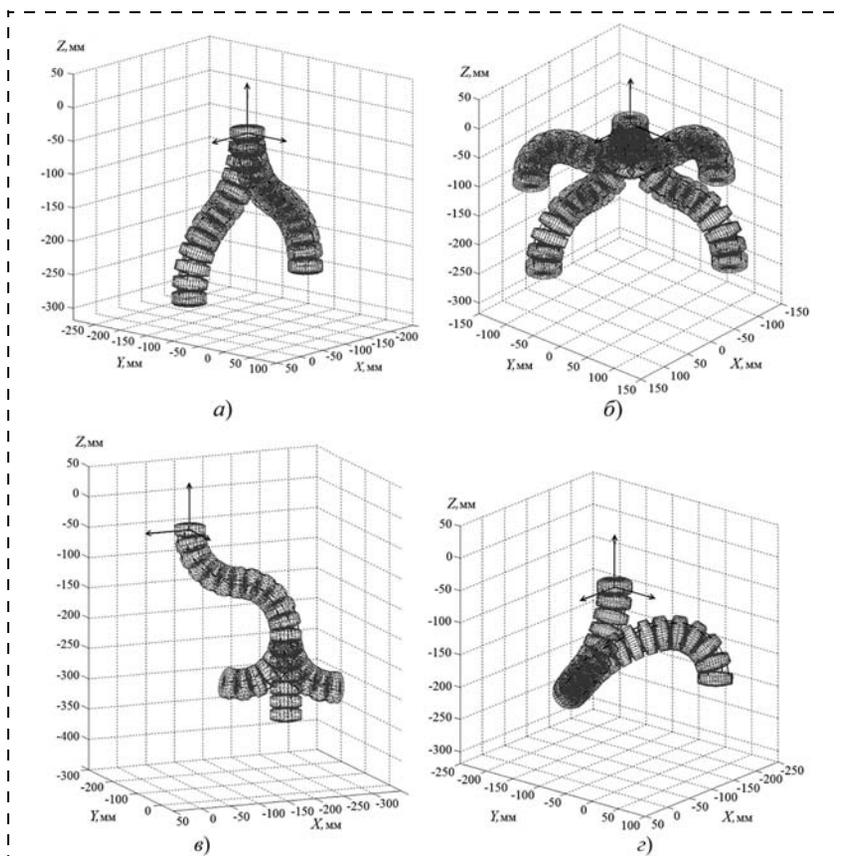


Рис. 5. Моделирование конфигурации многозвенных манипуляторов: а — двухзвенный манипулятор; б, в — трехзвенный манипулятор; г — четырехзвенный манипулятор

лом звеньев (рис. 5). На рис. 5, а показана возможная конфигурация двухзвенного манипулятора с постоянными значениями углов изгиба звеньев, но при разных значениях углов ψ_1 и ψ_2 . На рис. 5, б показана конфигурация трехзвенного манипулятора при различных значениях углов ψ звеньев, но при постоянных значениях углов их изгибов. Вариации конфигурации трехзвенного манипулятора при различных значениях углов ψ и α последнего звена представлены на рис. 5, в. И наконец, на рис. 5, г показана возможная сложная конфигурация четырехзвенного манипулятора при произвольных значениях углов ψ и α звеньев.

Выводы

В ходе исследований были получены следующие результаты:

1. Разработан математический аппарат для проведения кинематического анализа звена манипулятора с управляемым изгибом, включающий в себя решение как прямой, так и обратной задач кинематики при различных его конфигурациях, с учетом специфики движения элементов.

2. По результатам проверки полученных решений выявлены основные причины отклонений модельных значений от результатов натурных экспериментов.

В дальнейшем, основываясь на полученных результатах, планируется провести разработку и тестирование явной динамической модели звена, а также разработать методику создания упрощенных (быстрорасчетных) моделей динамики, необходимых для корректной работы системы управления. Также необходимо разработать уточненные методики моделирования, позволяющие учитывать специфику

решаемых задач, применяемые при изготовлении элементов манипулятора материалы, влияние внешней среды на базовые характеристики: точность и скорость отработки управляющих воздействий, устойчивость и т. д.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-02938а) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 1.40П.

Список литературы

1. Богданов Д. Р., Даринцев О. В. Конструктивные особенности манипуляторов с управляемым изгибом // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6; URL: www.science-education.ru/113-11784 (дата обращения: 12.03.2014).
2. Xin Dong, Mark Raffles, Salvador Cobos Guzman, Dragos Axinte, James Kell. Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints // Mechanism and Machine Theory. 2014. Vol. 77. P. 73–91.
3. Даринцев О. В. Использование технологий виртуализации в системах управления микророботами и микросистемами // Тр. Института механики им. П. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. Вып. 9. / Мат. V Росс. конф. с межд. участием "Многофазные системы: теория и приложения". Ч. II. Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. С. 47–52.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.
5. Даринцев О. В., Богданов Д. Р. Разработка информационной подсистемы многозвенного манипулятора на базе ПЛИС // Динамика научных исследований. 2011. Матер. VII Межд. научно-практ. конф. Т. 20. Технические науки. Физика. Пржемысль, Nauka i studia, 2011. С. 50–56.
6. Богданов Д. Р. Особенности построения информационной системы многозвенного манипулятора с учетом специфики среды // Тр. Института механики им. П. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. Вып. 9. / Мат. V Росс. конф. с межд. участием "Многофазные системы: теория и приложения". Ч. II. Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. С. 27–32.
7. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
8. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.

Kinematics of a Manipulator with a Controlled Bending on the Basis of Solid Elements with a Spherical Surface

D. R. Bogdanov, dr_bog@mail.ru, O. V. Darintsev, ovd@uimech.org✉,
Institute of Mechanics, Ufa Research Center, RAS, Ufa, 450054, Russian Federation

Corresponding author: Darintsev Oleg V., D. Sc, Head of Department,
Institute of Mechanics, Ufa Research Center, RAS, Ufa, 450054, Russian Federation, e-mail: ovd@uimech.org

Received on February 25, 2015

Accepted on March 12, 2015

The article describes a new class of manipulators, built on the basis of solid elements with a spherical surface. Their bending link is implemented by changing the lengths of the cables passing through 4 holes on the edges of the elements. The authors propose a method for a synthesis of a complete kinematic model of such manipulator's link. The main problems were with finding solutions to the fact that when a link is bent, there was a complex movement of the components' link: a turn of the coordinate system of the elements and their movement via the complicated path — epitrihoide. In the received kinematic model the movement of the manipulator was simulated (a direct problem of kinematics) and constructed on the basis of 1, 2, 3 and 4 links. A solution to the inverse kinematic task for a link manipulator based on a geometric approach was also obtained. The problems, which have to be taken into account when solving the direct and inverse dynamic tasks: 1) stretching of ropes of the flexural link and load changes; 2) non-linearity: transition from a static friction to the rolling friction at the points of contact of the elements at the beginning of the movement of elements. One possible solution is installation of 3-axis accelerometers and gyroscopes to link the elements for the study of the above-mentioned phenomena. A large number of matrix transformation multiplications require development of algorithms for fast calculation and relevant hardware architecture.

Keywords: manipulator, manipulator with a controlled bending, kinematic analysis, forward and inverse kinematics problem

For citation:

Bogdanov D. R., Darintsev O. V. Kinematics of a Manipulator with a Controlled Bending on the Basis of Solid Elements with a Spherical Surface, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 671–678.

DOI: 10.17587/mau.16.671-378

References

1. **Bogdanov D. R., Darintsev O. V.** *Konstruktivnye osobennosti manipulatorov s upravlyаемым izgibom* (Design features manipulators controlled bending), *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 2013, no. 6, available at: URL: www.science-education.ru/113-11784 (in Russian).

2. **Xin Dong, Mark Raffles, Salvador Cobos Guzman, Dragos Axinte, James Kell.** Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints, *Mechanism and Machine Theory*, 2014, vol. 77, pp. 73–91.

3. **Darintsev O. V.** *Ispol'zovanie tehnologij virtualizatsii v sistemah upravleniya mikrorobotami i mikrosistemami* (Using visualization technologies in control systems and microsystems microrobots), *Trudy Instituta mehaniki im. R. R. Mavljutova Ufimskogo nauchnogo centra RAN* (Proc. of the V Russian conf. with int. participating "Mnogofaznye sistemy: teoriya i prilozheniya", p. II, Ufa, Neftegazovoe delo), 2012, iss. 9, pp. 27–32 (in Russian).

faznye sistemy: teoriya i prilozheniya", P. II, Ufa, Neftegazovoe delo), 2012, iss. 9, pp. 47–52 (in Russian).

4. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike dlja nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers), Moscow, Nauka, 1973 (in Russian).

5. **Darintsev O. V., Bogdanov D. R.** *Razrabotka informacionnoj podsistemy mnogozvennogo manipulatora na baze PLIS* (Development of information subsystems multilink manipulator on FPGA), *Dinamika Nauchnyh Issledovanij — 2011*, Proc. VII Int. Scient. Conf., Engineering, physics Przhemysl', 2011, vol. 20, pp. 50–56 (in Russian).

6. **Bogdanov D. R.** *Osobennosti postroeniya informacionnoj sistemy mnogozvennogo manipulatora s uchjotom specifiky sredy* (Features of the construction of an information system multilink manipulator considering the specifics of the environment), *Trudy Instituta mehaniki im. R. R. Mavljutova Ufimskogo nauchnogo centra RAN* (Proc. of the V Russian conf. with int. participating "Mnogofaznye sistemy: teoriya i prilozheniya", p. II, Ufa, Neftegazovoe delo), 2012, iss. 9, pp. 27–32 (in Russian).

7. **Fu K., Gonsales R., Li K.** *Robototekhnika* (Robotics) M.: Mir, 1989. 624 p. (in Russian).

8. **Anurjev V. I.** *Spravochnik konstruktora mashinostroitelja* (Reference Constructor-Machine Builder), vol. 1. Moscow, Mashinostroenie, 2001, 920 p. (in Russian).

УДК 004.94

DOI: 10.17587/mau.16.678-685

Е. В. Страшнов, вед. программист, strashnov_evg@mail.ru,

М. В. Михайлюк, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. отделом, mix@niisi.ras.ru,

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

Моделирование ограничений на относительное движение шарнирно связанных тел в системах виртуального окружения¹

Рассматривается задача моделирования в масштабе реального времени динамики шарнирно связанных тел с ограничениями на их относительное движение. Эта задача может быть представлена в виде системы алгебраических уравнений с линейными дополнениями. Для решения такой системы в работе предлагается метод последовательных импульсов с использованием свойства временной когерентности. Устойчивость предлагаемого метода обеспечивается за счет стабилизации ограничений методом последовательных импульсов. Предложенные методы и алгоритмы реализованы в программных модулях и оформлены в виде исполняемой библиотеки для персональных компьютеров под управлением операционной системы Windows. Их апробация была проведена в подсистеме динамики для моделирования роботов, содержащих шарниры с ограничениями на параметры относительного движения.

Ключевые слова: система многих тел, шарниры, связи, параметры относительного движения, реакции связи, полуневная схема Эйлера, линейные дополнения, временная когерентность, стабилизация ограничений, псевдоимпульсы

Введение

В системах виртуальной реальности, в частности в тренажерных комплексах, часто возникает необходимость моделировать динамику системы многих тел с шарнирами. Реалистичное моделирование этой динамики позволяет повысить качество и скорость обучения операторов тренажеров и избежать формирования у них ложных навыков. Примерами систем с шарнирами являются автомобиль с прицепом, дверь на петлях, манипуляторы и т. д. Поэтому разработка методов моделирования таких систем является актуальной задачей.

Относительное движение тел, соединенных шарнирами, определяется с помощью наборов параметров. На эти параметры могут быть наложены ограничения (например, ограничение на угол поворота в сочленении робота). Задача состоит в том, чтобы смоделировать движение системы тел с учетом этих ограничений.

В системах виртуальной реальности необходимо использовать такие методы, которые обеспечат выполнение всех требуемых расчетов в режиме реального времени. Кроме того, необходимо, чтобы эти методы решали задачу для всевозможных конфигураций систем многих тел (конфигураций с открытыми и замкнутыми кинематическими цепями), в том числе и с заранее неизвестной структурой. Также требуется обеспечить устойчивость модели-

¹ Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-07-00708.

рования, под которым здесь подразумевается моделирование движения тел с соблюдением законов сохранения энергии и импульса.

Для решения данной задачи существуют две группы методов: с использованием минимального числа координат (методы с использованием обобщенных координат) и методы с использованием избыточного набора координат. Выполнимость требуемых свойств обеспечивается посредством методов с избыточным набором координат. Решаемая задача для данной группы методов сводится к задаче динамики систем многих тел с ограничениями.

Большинство работ в данной области посвящено моделированию контактного взаимодействия между телами и моделированию шарнирно-связанных тел без учета ограничений на относительное движение [1–3]. В статье [1] реализован импульсный подход, суть которого состоит в том, что для каждого шарнира оцениваются ошибки ограничений на следующем шаге моделирования, которые уменьшаются посредством итеративного применения импульсов. В работе [2] рассматривается задача обеспечения линейного времени вычислений с использованием метода множителей Лагранжа. В диссертации [3] кратко описываются существующие методы динамики тел с ограничениями. В работе [4] представлена технология составления ограничений на относительное движение в общем виде и приведены описания ограничений для двух типов шарниров (осевого и призматического). Однако в этой работе не указывается, как применять ограничения на параметры относительного движения в рамках используемого метода для моделирования динамики многих тел. В статьях [5, 6] применительно к задачам инверсной кинематики особое внимание уделено вопросам параметризации сферического шарнира, а также использованию более сложных ограничений.

Основное положение данной статьи состоит в расширении использования метода последовательных импульсов [7] до моделирования систем многих тел с ограничениями на параметры относительного движения. Для улучшения сходимости данного метода используется свойство временной когерентности, которое означает, что состояние системы тел (их координаты) за малый промежуток времени меняется незначительно. Помимо этого, решается задача стабилизации ограничений методом последовательных импульсов, гарантирующая устойчивое моделирование динамики шарниров даже при больших ошибках ограничений. Концептуальные основы данного исследования базируются на основных уравнениях и законах механики твердых тел. Апробация реализованных алгоритмов проводится в подсистеме динамики программного комплекса для моделирования реальных роботов.

Динамика системы многих тел с ограничениями

Рассмотрим систему из N тел, в которой i -е тело имеет массу m_i и тензор инерции \mathbf{I}_i . Уравнения

Ньютона—Эйлера, описывающие динамику i -го свободного твердого тела, имеют вид

$$m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{f}_i^e, \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \boldsymbol{\tau}_i^e, i = \overline{1, N},$$

где \mathbf{v}_i и $\boldsymbol{\omega}_i$ — векторы линейной и угловой скорости, \mathbf{f}_i^e и $\boldsymbol{\tau}_i^e$ — векторы всех внешних сил и моментов, действующих на i -е тело (компоненты гироскопического момента $\boldsymbol{\tau}_i^\omega = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i$ входят в вектор моментов $\boldsymbol{\tau}_i^e$). Перепишем эти уравнения в более компактном виде, объединяя линейную и угловую скорость в вектор $\mathbf{V}_i = (\mathbf{v}_i, \boldsymbol{\omega}_i)$, а силы и моменты — в вектор $\mathbf{F}_i^e = (\mathbf{f}_i^e, \boldsymbol{\tau}_i^e)$:

$$\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{V}}_i = \mathbf{F}_i^e, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}_i = \text{diag}(m_i \mathbf{E}_3, \mathbf{I}_i)$ — блочно-диагональная матрица масс размером 6×6 , \mathbf{E}_3 — единичная матрица размером 3×3 .

Координаты и ориентация тела задаются с помощью положения центра масс \mathbf{X}_i и единичного кватерниона $\mathbf{q}_i = (q_{iw}, \{q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}\})^T$ в мировой системе координат, которые могут быть вычислены на основе кинематических уравнений следующего вида:

$$\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{v}_i, \dot{\mathbf{q}}_i = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i * \mathbf{q}_i, i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где $*$ — умножение кватернионов [8]. По кватерниону \mathbf{q}_i может быть вычислена матрица поворота тела $\mathbf{R}_i(\mathbf{q}_i)$.

Пусть тела в системе связаны с помощью K шарниров. Тогда они перестают быть свободными и должны удовлетворять набору связей, которые могут быть голономными и неголономными, удерживающими и недерживающими. Мы будем рассматривать только голономные связи. Тогда для k -го шарнира, соединяющего i -е и j -е тела, удерживающие связи можно записать в виде

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{G}_k(\mathbf{X}_i, \mathbf{q}_i, \mathbf{X}_j, \mathbf{q}_j) = \mathbf{0}, k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

где размер $m_k = \dim(\mathbf{G}_k)$ вектора \mathbf{G}_k (число ограничений для k -го шарнира) равно числу степеней свободы системы, которые ограничивает k -й шарнир. При этом от функций \mathbf{G}_k потребуем, чтобы они были непрерывно дифференцируемыми функциями по своим аргументам. Относительное движение в шарнире определяется оставшимися $l_k = 6 - m_k$ степенями свободы.

Кроме этих ограничений могут быть также ограничения на параметры относительного движения тел (например, угол поворота одного тела относительно другого не должен превышать 90°). Такие ограничения описываются недерживающими связями. Без ограничения общности будем считать, что они

наложены на первые $S \leq K$ шарниров. Записывая эти ограничения через координаты движения, получим неудерживающие связи следующего вида:

$$\chi_s = \chi_s(\mathbf{X}_i, \mathbf{q}_i, \mathbf{X}_j, \mathbf{q}_j) \geq 0, \quad s = \overline{1, S}, \quad l_s = \dim(\chi_s), \quad (4)$$

где функции χ_s будем считать непрерывно-дифференцируемыми на некотором множестве Ω_s .

Производные от ограничений (3) и (4) имеют следующий вид:

$$\dot{\mathbf{G}}_k = \mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j, \quad \dot{\chi}_s = \tilde{\mathbf{J}}_{si} \mathbf{V}_i + \tilde{\mathbf{J}}_{sj} \mathbf{V}_j, \quad (5)$$

где \mathbf{J}_{ki} и \mathbf{J}_{kj} — матрицы-якобианы размерности $m_k \times 6$; $\tilde{\mathbf{J}}_{si}$ и $\tilde{\mathbf{J}}_{sj}$ — матрицы-якобианы размерности $l_s \times 6$, зависящие от координат тел.

Для выполнения связей приложим к телам дополнительные силы реакции связей. Из классической механики известно [9], что такие силы для ограничений (3) и (4) имеют вид

$$\mathbf{F}_i^c = \mathbf{J}_{ki}^T \lambda_k^G + \tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \lambda_s^\chi, \quad \mathbf{F}_j^c = \mathbf{J}_{kj}^T \lambda_k^G + \tilde{\mathbf{J}}_{sj}^T \lambda_s^\chi,$$

где λ_k^G и λ_s^χ — неизвестные множители Лагранжа.

Добавляя силы реакции связей для всех шарниров в уравнения Ньютона—Эйлера (1), получим:

$$\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{V}}_i = \mathbf{F}_i^e + \sum_{k \in K_i} \mathbf{J}_{ki}^T \lambda_k^G + \sum_{s \in S_i} \tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \lambda_s^\chi,$$

где K_i — множество шарниров, которые связывают i -е тело с другими телами; S_i — подмножество шарниров из множества K_i , для которых введены ограничения на параметры относительного движения.

Перейдем теперь от сил к импульсам. Для этого запишем разностную схему метода Эйлера, в которой вектор скоростей аппроксимируется следующим образом:

$$\dot{\mathbf{V}} \approx \frac{\mathbf{V}(t + \Delta t) - \mathbf{V}(t)}{\Delta t},$$

где Δt — шаг разностной схемы. Делая замены $\mathbf{p}_i^e(t) = \mathbf{F}_i^e(t) \Delta t$, $\mathbf{p}_k^G(t) = \lambda_k^G(t) \Delta t$ и $\mathbf{p}_s^\chi(t) = \lambda_s^\chi(t) \Delta t$, получим

$$\mathbf{V}_i(t + \Delta t) = \mathbf{V}_i(t) + \mathbf{M}_i^{-1}(t) (\mathbf{p}_i^e(t) + \sum_{k \in K_i} \mathbf{J}_{ki}^T \mathbf{p}_k^G(t) + \sum_{s \in S_i} \tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \mathbf{p}_s^\chi(t)). \quad (6)$$

Величины $\mathbf{J}_{ki}^T \mathbf{p}_k^G(t)$ и $\tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \mathbf{p}_s^\chi(t)$ будем называть импульсами реакций связей.

Используя кинематические уравнения (2), координаты тел в разностной схеме Эйлера будем опре-

делять через скорости тел в момент времени $t + \Delta t$ (полуявная схема Эйлера):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}_i(t + \Delta t) \\ \mathbf{q}_i(t + \Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_i(t) \\ \mathbf{q}_i(t) \end{pmatrix} + \Delta t \mathbf{H} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_i(t + \Delta t) \\ \boldsymbol{\omega}_i(t + \Delta t) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{где } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_q(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_q(t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_{ix}(t) & -q_{iy}(t) & -q_{iz}(t) \\ q_{iw}(t) & q_{iz}(t) & -q_{iy}(t) \\ -q_{iz}(t) & q_{iw}(t) & q_{ix}(t) \\ q_{iy}(t) & -q_{ix}(t) & q_{iw}(t) \end{bmatrix}.$$

Для определения неизвестных величин импульсов \mathbf{p}_k^G и \mathbf{p}_s^χ нужно сформировать дополнительные соотношения, которые определяются типом связи.

Недостающие условия для определения импульсов \mathbf{p}_k^G получим из соотношений (5), аппроксимируя производную от ограничений (3) в момент времени $t + \Delta t$ следующим образом:

$$\dot{\mathbf{G}}_k(t + \Delta t) = \mathbf{J}_{ki}(t) \mathbf{V}_i(t + \Delta t) + \mathbf{J}_{kj}(t) \mathbf{V}_j(t + \Delta t) = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Здесь предполагается, что якобианы меняются мало на промежутке от t до $t + \Delta t$.

Пусть для какого-нибудь ограничения в соотношениях (4) выполнено равенство $\chi_{sr}(t) = 0$ (здесь и далее индекс r означает компоненту вектора). Покажем, что в этом случае $\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) \geq 0$, $p_{sr}^\chi \geq 0$ и $\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) p_{sr}^\chi = 0$. Действительно, $\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t)$ не может быть отрицательной (так как в противном случае на следующем шаге получим $\chi_{sr}(t + \Delta t) < 0$). Таким образом,

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) &= \\ &= \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}(t) \mathbf{V}_i(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}(t) \mathbf{V}_j(t + \Delta t) \geq 0, \quad (9) \end{aligned}$$

где $\tilde{\mathbf{J}}_{si,r}(t)$ и $\tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}(t)$ — r -е строки матриц $\tilde{\mathbf{J}}_{si}$ и $\tilde{\mathbf{J}}_{sj}$.

Объединим координаты тела в вектор $\mathbf{X}'_i = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_i \\ \mathbf{q}_i \end{bmatrix}$.

Обобщенные силы реакции связи $\chi_{sr} \geq 0$ имеют вид $\mathbf{Q}_{si,r}^c = \left(\frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_i} \right)^T \lambda_{sr}^\chi$ для i -го тела и $\mathbf{Q}_{sj,r}^c = \left(\frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_j} \right)^T \lambda_{sr}^\chi$ для j -го тела. Вариация данной связи $\delta \chi_{sr}$ выражается через виртуальные перемещения $\delta \mathbf{X}'_i$ и $\delta \mathbf{X}'_j$ как $\delta \chi_{sr} = \frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_i} \delta \mathbf{X}'_i + \frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_j} \delta \mathbf{X}'_j \geq 0$. Работа обобщен-

ных сил реакции связи на виртуальных перемещениях равна

$$\begin{aligned} \delta A_{sr}^\chi &= (\mathbf{Q}_{si,r}^c)^T \delta \mathbf{X}'_i + (\mathbf{Q}_{sj,r}^c)^T \delta \mathbf{X}'_j = \\ &= \lambda_{sr}^\chi \left(\frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_i} \delta \mathbf{X}'_i + \frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_j} \delta \mathbf{X}'_j \right) = \lambda_{sr}^\chi \delta \chi_{sr}. \end{aligned}$$

Умножая работу δA_{sr}^χ на шаг Δt , получим $\delta A_{sr}^\chi \Delta t = p_{sr}^\chi \delta \chi_{sr}$. Из леммы для необратимых связей [10, §253] следует, что работа сил реакции неудерживающей связи неотрицательна для любого виртуального перемещения, т. е. $\delta A_{sr}^\chi \geq 0$.

Из условий $\delta \chi_{sr} \geq 0$ и $\delta A_{sr}^\chi \Delta t = p_{sr}^\chi \delta \chi_{sr} \geq 0$ следует, что должно быть выполнено условие

$$p_{sr}^\chi \geq 0. \quad (10)$$

Рассматривая вместо виртуальных перемещений действительные перемещения $d\chi_{sr} = \chi_{sr}(t + \Delta t) - \chi_{sr}(t) = \chi_{sr}(t + \Delta t)$, получаем, что работа обобщенных сил реакции на этих перемещениях, помноженная на Δt , имеет вид $dA_{sr}^\chi \Delta t = p_{sr}^\chi \chi_{sr}(t + \Delta t)$. Из леммы [10, §253] следует, что на любом действительном перемещении работа сил реакции неудерживающей связи равна нулю, что приводит к условию $p_{sr}^\chi \chi_{sr}(t + \Delta t) = 0$.

Так как мы используем полуявную схему Эйлера (7), то из формулы Тейлора, отбрасывая малые члены, получим

$$\begin{aligned} \chi_{sr}(t + \Delta t) &= \chi_{sr}(\mathbf{X}'_i(t + \Delta t), \mathbf{X}'_j(t + \Delta t)) = \\ &= \chi_{sr}(\mathbf{X}'_i(t) + \Delta t \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i(t + \Delta t), \mathbf{X}'_j(t) + \Delta t \mathbf{H}_j \mathbf{V}_j(t + \Delta t)) \approx \\ &\approx \chi_{sr}(\mathbf{X}'_i(t), \mathbf{X}'_j(t)) + \Delta t \frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_i} \mathbf{H}_i \mathbf{V}_i(t + \Delta t) + \\ &+ \Delta t \frac{\partial \chi_{sr}}{\partial \mathbf{X}'_j} \mathbf{H}_j \mathbf{V}_j(t + \Delta t) = \chi_{sr}(t) + \Delta t \dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t). \end{aligned}$$

Умножая обе части этого выражения на p_{sr}^χ и учитывая, что $\chi_{sr}(t) = 0$ и $p_{sr}^\chi \chi_{sr}(t + \Delta t) = 0$, получим

$$\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) p_{sr}^\chi = 0. \quad (11)$$

Объединяя (6), (8)—(11), получим задачу с линейными дополнениями для определения $\mathbf{V}_i(t + \Delta t)$,

\mathbf{p}_k^G и \mathbf{p}_s^χ :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i(t + \Delta t) &= \\ &= \mathbf{V}_i(t) + \mathbf{M}_i^{-1} \left(\mathbf{p}_i^e + \sum_{k \in K_i} \mathbf{J}_{ki}^T \mathbf{p}_k^G + \sum_{s \in S_i} \tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \mathbf{p}_s^\chi \right); \\ \dot{\mathbf{G}}_k(t + \Delta t) &= \mathbf{0}; \end{aligned} \quad (12)$$

если $\chi_{sr}(t) = 0$, то $\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) \geq 0$, $p_{sr}^\chi \geq 0$,

$$\dot{\chi}_{sr}(t + \Delta t) p_{sr}^\chi = 0; \quad i = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, K}, \quad s = \overline{1, S}, \quad r = \overline{1, L_s}.$$

В силу того что задача (12) не содержит ограничений (3) и (4), дополнительно будем решать задачу стабилизации этих ограничений (под стабилизацией здесь подразумевается стабилизация ОДУ по отношению к инвариантному множеству, заданному ограничениями вида (3) и (4)).

Метод последовательных импульсов

Среди возможных методов решения задачи (12) выделяются два основных: первый состоит в одно-временном определении всех неизвестных импульсов при решении задачи (12) целиком, а второй подход состоит в решении более мелких задач при декомпозиции задачи (12). Первый подход подразумевает использование как прямых, так и итерационных методов. Второй подход является итерационным и называется методом последовательных импульсов [7, 11, 12].

Метод последовательных импульсов содержит несколько шагов, некоторые из которых выполняются итерационно.

1. Сначала к телам применяются все известные импульсы \mathbf{p}_i^e от внешних сил. После их применения получим новые скорости тел $\mathbf{V}_i^{(1)}(t + \Delta t)$.

2. Далее применяются импульсы $\mathbf{J}_{ki}^T \mathbf{p}_k^G$ и $\tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \mathbf{p}_s^\chi$ с предыдущего шага моделирования, после чего получим новые скорости тел $\mathbf{V}_i^{(2)}(t + \Delta t)$.

3. Последовательно для каждого шарнира решаются задачи для определения $\Delta \mathbf{p}_k^G$, которые должны обеспечить выполнение ограничений (8), записанных через скорости $\mathbf{V}_i^{(2)}(t + \Delta t)$. Глобальное решение \mathbf{p}_k^G будет суммой всех применяемых импульсов на каждой итерации: $\mathbf{p}_k^G = \sum \Delta \mathbf{p}_k^G$. Далее применяются импульсы $\mathbf{J}_{ki}^T \Delta \mathbf{p}_k^G$ для получения новых скоростей тел $\mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t)$.

4. Аналогично шагу 3 последовательно для каждого шарнира решаются задачи для определения Δp_{sr}^χ , обеспечивающих выполнение условий (9)—(11), записанных через скорости $\mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t)$. Далее, применяя полученные импульсы в уравнениях (6), получим новые скорости $\mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t)$ и $p_{sr}^\chi = \sum \Delta p_{sr}^\chi \geq 0$.

5. Если критерий окончания итераций выполнен, то для каждого тела получим окончательные ско-

рости $\mathbf{V}_i(t + \Delta t) = \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t)$, иначе $\mathbf{V}_i^{(2)}(t + \Delta t) = \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t)$ и переходим к шагу 3.

Опишем данные шаги более подробно. Первый шаг состоит в вычислении новых значений скоростей $\mathbf{V}_i^{(1)}(t + \Delta t) = \mathbf{V}_i(t) + \mathbf{M}_i^{-1}(t)\mathbf{p}_i^e(t)$ с использованием только импульсов внешних сил. Второй шаг использует свойство временной когерентности, означающее, что состояние механической системы от шага к шагу меняется незначительно. Данное свойство позволяет ускорить сходимость метода последовательных импульсов, если использовать импульсы с предыдущего шага моделирования в качестве начальных приближений в текущем шаге моделирования. Третий шаг состоит в решении задачи для импульсов $\Delta \mathbf{p}_k^G$, которую сформулируем из условий (6) и (8)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_i^{(2)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{J}_{ki}^T \Delta \mathbf{p}_k^G; \\ \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_j^{(2)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{J}_{kj}^T \Delta \mathbf{p}_k^G; \\ \mathbf{p}_k^G &= \sum \Delta \mathbf{p}_k^G; \\ \mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t) &= \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя первые два уравнения в последнее уравнение, получим систему линейных алгебраических уравнений с m_k неизвестными (m_k — число ограничений для k -го шарнира):

$$\begin{aligned} (\mathbf{J}_{ki} \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{J}_{ki}^T + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{J}_{kj}^T) \Delta \mathbf{p}_k^G &= \\ = -\mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i^{(2)}(t + \Delta t) - \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j^{(2)}(t + \Delta t). \end{aligned} \quad (14)$$

Четвертый шаг метода последовательных импульсов состоит в решении задачи с ограничениями на относительное движение в шарнире. На основе соотношений (6), (9)—(11) будем искать такие импульсы Δp_{sr}^χ , для которых должны быть выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_i^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}^T \Delta p_{sr}^\chi; \\ \mathbf{V}_j^{(4)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_j^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}^T \Delta p_{sr}^\chi; \\ \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(4)}(t + \Delta t) &\geq 0; \\ p_{sr}^\chi &= \sum \Delta p_{sr}^\chi \geq 0; \\ (\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(4)}(t + \Delta t)) p_{sr}^\chi &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставим первые два уравнения из (15) в последнее уравнение. Будем искать такой импульс Δp_{sr}^χ , для которого выражение в скобках в послед-

нем уравнении (15) будет равно нулю. Тогда получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{M}_i^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}^T + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{M}_j^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}^T) \Delta p_{sr}^\chi &= \\ = -\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) - \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t). \end{aligned} \quad (16)$$

Величина $m_{eff}^{-1} = \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{M}_i^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}^T + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{M}_j^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}^T$ в уравнении (16) положительна, так как матрицы масс \mathbf{M}_i и \mathbf{M}_j , симметричные и положительно определенные (каждая матрица масс содержит массу, умноженную на единичную матрицу, и симметричную положительно определенную матрицу тензора инерции). Если при добавлении к глобальному решению p_{sr}^χ (полученному с предыдущих итераций) решения $\Delta p_{sr}^{\chi(1)} = \Delta p_{sr}^\chi$ импульс $p_{sr}^\chi + \Delta p_{sr}^{\chi(1)} \geq 0$, то все условия в (15) будут выполнены.

Если же окажется, что $p_{sr}^\chi + \Delta p_{sr}^{\chi(1)} < 0$, то заменим Δp_{sr}^χ на $\Delta p_{sr}^\chi = \Delta p_{sr}^{\chi(2)} = -p_{sr}^\chi$. Тогда получим $p_{sr}^\chi + \Delta p_{sr}^{\chi(2)} = 0$, и последние два условия в формуле (15) будут выполнены. Покажем, что после применения импульса $\Delta p_{sr}^{\chi(2)}$ будет выполняться и третье условие в (15). Из условий $p_{sr}^\chi + \Delta p_{sr}^{\chi(2)} = 0$ и $p_{sr}^\chi + \Delta p_{sr}^{\chi(1)} < 0$ следует, что $\Delta p_{sr}^{\chi(1)} < -p_{sr}^\chi = \Delta p_{sr}^{\chi(2)}$. После применения измененного импульса $\Delta p_{sr}^{\chi(2)} > \Delta p_{sr}^{\chi(1)}$ на основе первых двух уравнений в (15) и того, что $\Delta p_{sr}^{\chi(1)}$ является решением (16), имеем

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(4)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(4)}(t + \Delta t) &= \\ = \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t) + m_{eff}^{-1} \Delta p_{sr}^{\chi(2)} &> \\ > \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{(3)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{(3)}(t + \Delta t) + m_{eff}^{-1} \Delta p_{sr}^{\chi(1)} &= 0. \end{aligned}$$

Последний шаг метода последовательных импульсов состоит в проверке критерия окончания итераций. В качестве критерия окончания итераций может быть выбран критерий малости применяемых импульсов для заданной точности ε :

$$\|\Delta \mathbf{p}_k^G\| < \varepsilon, |\Delta p_{sr}^\chi| < \varepsilon, k = \overline{1, K}, s = \overline{1, S}, r = \overline{1, L_s}. \quad (17)$$

В силу того что задачи (13) и (15) не содержат ограничений (3) и (4), в процессе моделирования эти ограничения могут нарушаться. Задача восстановления ограничений (3) и (4) называется *задачей стабилизации*. Одним из методов стабилизации яв-

ляется метод на основе отдельных импульсов. Этот метод является модификацией метода Баумгарте [13, 14] и позволяет моделировать систему многих тел с соблюдением законов динамики (без изменения механической энергии системы). В данном методе для каждого тела вводятся два типа скоростей: обычные \mathbf{V}_i и псевдоскорости \mathbf{V}_i^* , при этом дополнительно для псевдоскоростей решаются задачи, аналогичные (13) и (15), уже в терминах псевдоимпульсов. Различие между импульсами и псевдоимпульсами будет состоять в том, что вместо первых двух шагов (применение внешних сил и использование свойства временной когерентности) будет проводиться обнуление (инициализация) псевдоскоростей для всех тел, т. е. $\mathbf{V}_i^{*(2)}(t + \Delta t) = \mathbf{0}$. В качестве начального приближения для псевдоимпульсов используются нулевые псевдоимпульсы, т. е. $\mathbf{p}_k^{*G} = \mathbf{0}$ и $\mathbf{p}_s^{*\chi} = \mathbf{0}$.

При составлении задач на псевдоимпульсы меняются условия (8), (9) и (11) следующим образом:

$$\mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i^*(t + \Delta t) + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j^*(t + \Delta t) + ERP \cdot \mathbf{G}_k(t) = \mathbf{0};$$

$$\begin{aligned} \chi_{sr}(t) < 0: \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^*(t + \Delta t) + \\ + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^*(t + \Delta t) + ERP \cdot \chi_{sr}(t) \geq 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^*(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^*(t + \Delta t) + \\ + ERP \cdot \chi_{sr}(t)) p_{sr}^{*\chi} = 0, \end{aligned}$$

где $0 \leq ERP \leq 1$ — параметр уменьшения ошибки.

Для стабилизации ограничений (3) задача (13) в терминах псевдоимпульсов $\Delta \mathbf{p}_k^{*G}$ примет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{*(3)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_i^{*(2)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{J}_{ki}^T \Delta \mathbf{p}_k^{*G}; \\ \mathbf{V}_j^{*(3)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_j^{*(2)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{J}_{kj}^T \Delta \mathbf{p}_k^{*G}; \\ \mathbf{p}_k^{*G} &= \sum \Delta \mathbf{p}_k^{*G}; \\ \mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i^{*(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j^{*(3)}(t + \Delta t) + ERP \cdot \mathbf{G}_k(t) &= \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя первые два уравнения из (18) в последнее уравнение, получим систему линейных уравнений относительно неизвестных $\Delta \mathbf{p}_k^{*G}$:

$$\begin{aligned} (\mathbf{J}_{ki} \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{J}_{ki}^T + \mathbf{J}_{kj} \mathbf{M}_j^{-1} \mathbf{J}_{kj}^T) \Delta \mathbf{p}_k^{*G} = \\ = -\mathbf{J}_{ki} \mathbf{V}_i^{*(2)}(t + \Delta t) - \mathbf{J}_{kj} \mathbf{V}_j^{*(2)}(t + \Delta t) - ERP \cdot \mathbf{G}_k(t). \end{aligned}$$

Для стабилизации ограничений (4) задача (15) в терминах псевдоимпульсов $\Delta p_{sr}^{*\chi}$ примет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i^{*(4)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_i^{*(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_i^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}^T \Delta p_{sr}^{*\chi}; \\ \mathbf{V}_j^{*(4)}(t + \Delta t) &= \mathbf{V}_j^{*(3)}(t + \Delta t) + \mathbf{M}_j^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}^T \Delta p_{sr}^{*\chi}; \\ \tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{*(4)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{*(4)}(t + \Delta t) + \\ + ERP \cdot \chi_{sr}(t) &\geq 0; \\ p_{sr}^{*\chi} &= \sum \Delta p_{sr}^{*\chi} \geq 0; \\ (\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{*(4)}(t + \Delta t) + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{*(4)}(t + \Delta t) + \\ + ERP \cdot \chi_{sr}(t)) p_{sr}^{*\chi} &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Неизвестные псевдоимпульсы $\Delta p_{sr}^{*\chi}$ вычисляются так же, как и импульсы Δp_{sr}^χ , а необходимые уравнения можно получить, если подставить первые два уравнения в (19) в последнее уравнение

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{M}_i^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{si,r}^T + \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{M}_j^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r}^T) \Delta p_{sr}^{*\chi} = \\ = -\tilde{\mathbf{J}}_{si,r} \mathbf{V}_i^{*(3)}(t + \Delta t) - \tilde{\mathbf{J}}_{sj,r} \mathbf{V}_j^{*(3)}(t + \Delta t) - ERP \cdot \chi_{sr}(t). \end{aligned}$$

Алгоритмическая часть метода последовательных импульсов на каждом шаге моделирования состоит в следующем.

1. Цикл по всем телам:
вычисляем скорости тела после применения внешних сил.
Конец цикла.
2. Цикл по всем шарнирам:
вычисляем скорости тел после применения импульсов $\mathbf{J}_{ki}^T \mathbf{p}_k^G$ и $\mathbf{J}_{si}^T \mathbf{p}_s^\chi$. Конец цикла.
3. Цикл по итерациям:
цикл по всем шарнирам:
вычисляем из (14) величины импульсов $\Delta \mathbf{p}_k^G$.
Вычисляем из (13) новые скорости тел после применения импульсов $\mathbf{J}_{ki}^T \Delta \mathbf{p}_k^G$.

Вычисляем накопленные импульсы $\mathbf{p}_k^G = \mathbf{p}_k^G + \Delta \mathbf{p}_k^G$.
Вычисляем из (16) величины импульсов $\Delta \mathbf{p}_s^\chi$.
Вычисляем из (15) новые скорости после применения импульсов $\tilde{\mathbf{J}}_{si}^T \Delta \mathbf{p}_s^\chi$.

Вычисляем накопленные импульсы $\mathbf{p}_s^\chi = \mathbf{p}_s^\chi + \Delta \mathbf{p}_s^\chi$.
Конец цикла.

Если выполнено (17), то завершаем итерации.
4. Цикл по итерациям аналогично п. 3, но для псевдоимпульсов и псевдоскоростей.

5. Цикл по всем телам:
обновляем положение и ориентацию тела на основе скоростей и псевдоскоростей.
Обнуляем псевдоскорости тела.
Конец цикла.



Робот с тележкой (KRT100-МП)

На основе предложенных в данной работе методов разработано алгоритмическое и программное обеспечение, реализованное в программных модулях на языке C++. Эти модули внедрены в систему динамики, являющуюся составной частью имитационно-тренажерного комплекса управления сложными процессами, созданную в НИИСИ РАН. Данный программный комплекс реализует базовые возможности динамики твердых тел, включая движение твердых тел, моделирование колес и гусениц, обработку столкновений (коллизий) между телами и динамику электродвигателей постоянного тока, а также обеспечивает моделирование большинства физических процессов (трение между телами при контакте, трение колеса с поверхностью, удар двух тел и т. д.). Разработанные технологии позволяют моделировать широкий класс колесных и гусеничных роботов, которыми управляет оператор с помощью пультов управления во время тренировки. Элементы роботов или других динамических объектов могут быть соединены с помощью шарниров, которые также могут быть оснащены электрическими двигателями, что позволяет управлять параметрами относительного движения. Комплексная апробация описанных методов и алгоритмов на многих моделях показала полную их адекватность требованиям систем виртуального окружения.

На рисунке показана модель робота с тележкой KRT100-МП, которым управляет оператор во время тренировки в имитационно-тренажерном комплексе. Тележка соединяется с роботом с помощью сферического шарнира с ограничениями. Это означает, что при поворотах робота или наезде на горку тележка располагается под некоторыми углами к роботу, значения которых не могут превышать 18° для осей X и Z и 15° для оси Y .

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 13-07-00708.

Заключение

Применение метода последовательных импульсов с использованием свойства временной когерентности позволяет достаточно эффективно моделировать системы многих тел с шарнирами, для которых заданы ограничения на относительное движение. Метод отдельных импульсов для стабилизации ограничений обеспечивает приемлемую точность моделирования, необходимую для задач визуализации и виртуальной реальности, т. е. ограничения (3) и (4) в процессе моделирования не нарушаются больше, чем нужно для визуального восприятия. Стабилизация с использованием псевдоимпульсов обеспечивает устойчивое моделирование с соблюдением требуемых законов сохранения энергии и импульса. Предложенные методы могут быть использованы в виртуальных лабораториях, имитационных комплексах, системах моделирования динамики сложных объектов и т. д.

Список литературы

1. **Bender J., Schmitt A.** Fast dynamic simulation of multi-body systems using impulses. In Virtual Reality Interactions and Physical Simulations // VRIPhys. 2006, November. P. 81–90.
2. **Baraff D.** Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers, In SIG-GRAPH '96: Proceeding of the 23rd annual conference on Computer Graphics and interactive techniques // ACM Press. 1996. P. 137–146.
3. **Garstenaue H.** A Unified Framework for Rigid Body Dynamics. Master's thesis. Linz: Johannes Kepler Universitat, 2006.
4. **Kenny Erleben.** Stable, robust, and versatile multibody dynamics animation, PhD thesis. University of Copenhagen, 2004.
5. **Grassia F. S.** Practical Parametrization of Rotations using Exponential Map // Journal of Graphics Tools. Vol. 3 (3). P. 29–48, 1998.
6. **Baerlocher P., Boulic R.** Parametrization and range of motion of the ball-and-socket joint // Proc. of AVATARS'2000 Conference, Lausanne. 2000. P. 180–190.
7. **Михайлюк М. В., Страшнов Е. В.** Моделирование системы связанных тел методом последовательных импульсов // Труды НИИСИ РАН. 2014. Т. 4, № 2. С. 52–60.
8. **Baraff D.** An Introduction to Physically Based Modelling: Rigid Body Simulation II: Nonpenetrations Constraints. URL: <http://www.cs.cmu.edu/~baraff/pbm/pbm.html>, [2015-27-01].
9. **Shabana A. A.** Computational Dynamics. Third edition. John Wiley & Sons Inc., 2010.
10. **Валле-Пууссен Ш.-Ж.** Лекции по теоретической механике. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948–1949.
11. **Catto E.** Iterative dynamics with temporal coherence // Game Developer Conference. 2005. P. 1–24.
12. **Catto E.** Modelling and solving constraints // Game Developers conference. 2009.
13. **Baumgarte J.** Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems // Computer methods in applied mechanics and engineering. 1972. Vol. 1 (1). P. 1–16.
14. **Cline M. B., Pai D. K.** Post-stabilization for rigid body simulation with contact and constraints // Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Autom., 2003.

Simulation of Restrictions for the Relative Motion of the Articulated Rigid Bodies in the Virtual Environment Systems

E. V. Strashnov, strashnov_evg@mail.ru, **M. V. Michaylyuk**, mix@niisi.ras.ru✉,
Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, 117218, Russian Federation

Corresponding author: **Michaylyuk Mikhail V.**, D. Sc., Professor,
Head of Department, Scientific Research Institute for System Analysis, RAS,
Moscow, 117218, Russian Federation, e-mail: mix@niisi.ras.ru

Received on @@@, 2015

Accepted on @@@, 2015

The topic of this paper is a real-time simulation of the dynamics of a system of articulated rigid bodies with restrictions on their relative motion. Restrictions are set in the form of inequalities for the relative angles of rotation (for the rotational joints) or relative displacement (for the prismatic joints) of links. Examples of such systems are robots and manipulators, mobile vehicles with trailers, hinged doors, etc. This problem can be presented as a system of linear algebraic equations with linear complements. As a solution for this system the authors propose the method of sequential impulses utilizing a temporal coherence property, which means that the state of a multi-body system (their coordinates) varies slightly for a small period of time. The semi-implicit Euler method is used as the difference scheme. Since the problem presented in the form of a system of linear equations with linear complements is solved relative to velocities, it is necessary to ensure achievement of constraints relative to the body coordinates (task of constraint stabilization). For such a stabilization the authors propose to use the method of split impulses, which ensures stability of the dynamics simulation for a multi-body system. In this paper the authors consider methods used both for the open and closed kinematic chains. The proposed methods and algorithms are implemented in the program modules in the form of dynamic libraries for Windows OS. Their approbation was carried out in the subsystem of dynamics simulation performing simulation of the robots containing joints with restrictions on the parameters of the relative motion. Studies have shown that the proposed methods and algorithms meet the requirements for the dynamics simulation subsystems of the simulators for control of complex dynamic processes, and virtual environment systems. Such technologies can also be used in virtual labs, simulation complexes, systems of augmented virtual environment and other applications.

Keywords: multibody system, joints, constraints, parameters of relative motion, constraints reaction, semi-implicit Euler method, linear complements, temporal coherence, stabilization of constraints, pseudo impulses

Acknowledgements: This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research, project no. 13-07-00708.

For citation:

Strashnov E. V., Michaylyuk M. V. Simulation of Restrictions for the Relative Motion of the Articulated Rigid Bodies in the Virtual Environment Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 678–685.

DOI: 10.17587/mau.16.678-685

References

1. **Bender J., Schmitt A.** Fast dynamic simulation of multi-body systems using impulses. In *Virtual Reality Interactions and Physical Simulations, VRPhys*, 2006, November, pp. 81–90.
2. **Baraff D.** Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers, In *SIG-GRAPH '96: Proceeding of the 23 rd annual conference on Computer Graphics and interactive techniques, ACM Press*, 1996, pp. 137–146.
3. **Garstenaue H.** A Unified Framework for Rigid Body Dynamics. Master's thesis, Linz, Johannes Kepler Universitat, 2006.
4. **Erleben K.** Stable, robust, and versatile multibody dynamics animation, PhD thesis, University of Copenhagen, 2004.
5. **Grassia F. S.** Practical Parametrization of Rotations using Exponential Map, *Journal of Graphics Tools*, 1998, vol. 3 (3), pp. 29–48.

6. **Baerlocher P., Boulic R.** Parametrization and range of motion of the ball-and-socket joint, *Proc. of AVATARS'2000 Conference*, Lausanne, 2000, pp. 180–190.

7. **Mikhailiyuk M. V., Strashnov E. V.** Modelirovanie sistemy svyazannykh tel metodom posledovatel'nykh impul'sov (Simulation of related bodies by successive pulses), *Trudy NIISI RAN*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 52–60 (in Russian).

8. **Baraff D.** An Introduction to Physically Based Modelling: Rigid Body Simulation II: Nonpenetrations Constraints, available at: www.cs.cmu.edu/~baraff/pbm/pbm.html [2015-27-01].

9. **Shabana A. A.** *Computational Dynamics*. Third edition, John Wiley & Sons Inc., 2010.

10. **Valle-Pussen Sh.-Zh.** *Lektsiipo teoreticheskoi mekhanike* (Lectures on theoretical mechanics), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1948–1949 (in Russian).

11. **Catto E.** Iterative dynamics with temporal coherence, *Game Developer Conference*, 2005, pp. 1–24.

12. **Catto E.** Modelling and solving constraints, *Game Developers conference*, 2009.

13. **Baumgarte J.** Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1972, vol. 1 (1), pp. 1–16.

14. **Cline M. B., Pai D. K.** Post-stabilization for rigid body simulation with contact and constraints, *Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Autom.*, 2003.

Т. А. Алиев, д-р техн. наук, проф., академик НАНА, директор, director@cyber.az,

А. Г. Рзаев, канд. техн. наук, зав. лаб., asifrzayev48@gmail.com,

Г. А. Гулуев, канд. техн. наук, зав. лаб., scb_06@mail.ru,

Т. А. Ализаде, канд. техн. наук, зав. лаб., alizadabaku@gmail.com,

У. Э. Саттарова, ст. науч. сотр., ulker.rzaeva@gmail.com, **Н. Э. Рзаева**, науч. сотр., nikanell@gmail.com

Институт систем управления НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Система диагностики и управления штанговых глубинно-насосных установок нефтяных скважин с использованием робастной Noise-технологии

Проведен анализ задачи диагностики неисправностей штанговых глубинно-насосных установок (ШГНУ), вызванных влиянием специфических эксплуатационных помех. Предложена технология определения робастных нормированных корреляционных функций, на основе которых формируются комбинации информативных признаков, соответствующих возможным аварийным состояниям ШГНУ. Идентификация этих состояний дублируется путем определения и формирования комбинаций соответствующих Noise-характеристик сигнала усилия, что повышает степень надежности результатов диагностики. Предложенные алгоритмы обработки позволяют решить задачу идентификации сигнала усилия с помощью недорогих контроллеров в реальном масштабе времени. Применение предложенной системы диагностики позволило на более чем 100 установках значительно повысить рентабельность нефтяных скважин.

Ключевые слова: Noise-технология, динамограмма, штанговая насосная установка, нефтяная скважина, дисперсия шума, взаимнокорреляционная функция

Введение

Наиболее распространенный способ механизированной добычи нефти основан на применении штанговых глубинно-насосных установок (ШГНУ). В настоящее время в мировой практике широко используется штанговый насосный способ добычи нефти, который охватывает более 2/3 общего действующего фонда [1]. Этот способ популярен из-за своей простоты, надежности и возможности применения в широком диапазоне условий эксплуатации.

Однако с каждым днем из-за уменьшения запасов нефти, увеличения заводнения пластов, простоев скважин за счет несвоевременной диагностики состояния оборудования рентабельность добычи нефти ШГНУ существенно падает. Поэтому повышение адекватности идентификации и диагностики неисправностей ШГНУ является основной проблемой в деле обеспечения рентабельности длительно эксплуатируемых нефтяных месторождений. Своевременное обнаружение скрытого периода возникновения неисправностей ШГНУ и заблаговременное принятие необходимых мер по их устранению может обеспечить необходимый уровень стабилизации добычи нефти. В целях увеличения межремонтного периода и создания наиболее благоприятных условий для организации управления процессом нефтедобычи были предложены различные методы

и средства технического контроля и диагностирования ШГНУ [2—11]. Поскольку полные и наименее искаженные данные о состоянии подземного насосного оборудования содержатся в информации об усилении в точке подвеса штанг глубинных насосов, то общепринятый способ контроля работы и диагностирования ШГНУ основан на динамометрировании, т. е. съеме и анализе кривой усилия $U_p(t)$, получаемой от датчика усилия в точке подвеса штанг $P(S)$.

В работе [2] показана возможность распознавания кривых усилия $U_p(t)$ с применением инфранизкочастотных анализаторов спектров. Преимуществом данного метода считается возможность получения спектра амплитуды динамограммы. Так, например, было выявлено, что динамограммы нормальной работы насоса не имеют четных гармоник, а динамограммы работы насоса с утечкой имеют четные гармоники, амплитуды которых сильно зависят от объема утечки. Однако число распознаваемых видов неисправностей при этом достигало всего четырех [2]. Для распознавания неисправностей по динамограммам был также использован статистический метод, выгодно отличающийся от других методов разделения видов динамограмм на классы малыми объемами вычисления и памяти, требуемыми при его применении. В работах

[2, 3, 5—8] подробно описаны результаты исследований в этом направлении, сформированы научные основы и созданы различные системы диагностики и контроля ШГНУ по динамограммам на устье скважины. При этом различают следующие *методы диагностирования по динамограммам* [2]:

- с использованием первичных признаков наземной динамограммы;
- с использованием вторичных признаков наземной динамограммы (характеристик спектра: дисперсии, корреляции и регрессии сигнала датчика усилия, коэффициентов разложения динамограммы в ряд Фурье и т. д.);
- с использованием характерных признаков формы наземной динамограммы;
- по результатам сравнения формы наземной динамограммы с эталонной, снятой сразу после ремонта скважины и хранящейся в памяти устройства;
- по признакам плунжерной динамограммы, рассчитанной по данным наземной динамограммы и конструкции скважины;
- по характерным признакам формы плунжерной динамограммы.

Недостатком всех этих методов является отсутствие возможности автоматизации процесса идентификации динамограммы в реальном масштабе времени с достаточной адекватностью. В большинстве случаев идентификация динамограммы осуществляется путем ее интерпретации в полуавтоматическом режиме, т. е. путем визуального анализа полученной динамометрической информации специалистом-технологом, на основании которого он принимает окончательное решение о появлении соответствующей неисправности ШГНУ. Однако, поскольку в данном случае результат диагностики зависит от квалификации специалиста-технолога, а сам процесс диагностики совокупности скважин занимает достаточно долгое время, то весьма актуальной является проблема разработки новых технологий идентификации динамограмм с применением современных контроллеров в реальном масштабе времени. Здесь целесообразно обеспечить мониторинг скрытого периода зарождения процесса перехода ШГНУ в аварийное состояние путем идентификации именно сигнала усилия штанг на подвеску за период качания станка-качалки. Одним из перспективных направлений является создание гибридной технологии анализа и идентификации сигналов усилия на подвеску с сочетанием возможностей технологий корреляционного анализа и Noise-анализа [7—10].

Постановка задачи

В известных системах контроля ШГНУ информация о динамограмме поступает от датчиков усилия и хода в виде электрического сигнала усилия $U_p(t)$ и хода $U_s(t)$ через канал связи. С использованием сочетания этих двух переменных $U_p(t)$ и $U_s(t)$ формируется динамограмма $U_p(t) = f(U_s)$, пред-

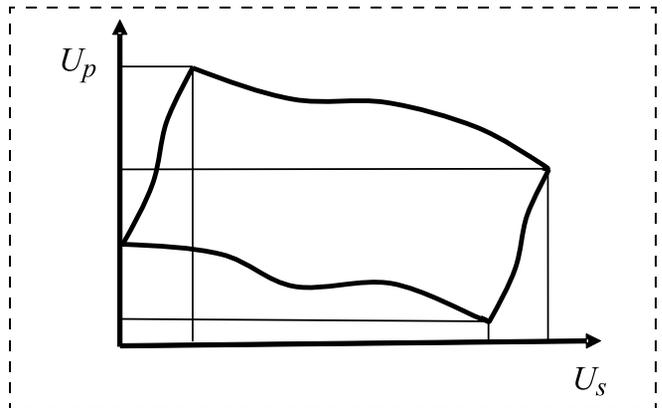


Рис. 1. Типовая динамограмма нормальной работы ШГНУ

ставляющая собой параллелограмм, вид которого с учетом искажений представлен на рис. 1. Специалист-технолог путем визуального анализа искажений на различных участках ее формы определяет более двадцати видов неисправностей ШГНУ [2]. Однако выполнение этой работы для сотни скважин представляет собой трудную задачу. Необходимо отметить, что при аппаратной реализации процесса идентификации состояния объекта нет необходимости использования $U_s(t)$, так как путем анализа только кривой напряжений $U_p(t)$ можно осуществить диагностику ШГНУ.

Основная трудность решения этой задачи связана с отсутствием технологии, позволяющей обеспечить адекватность идентификации сигнала усилия $U_p(t)$ в реальном масштабе времени. Например, при применении для этой цели технологии корреляционного анализа не обеспечивается условие робастности, так как погрешность полученных оценок корреляционных функций в результате влияния шума $\varepsilon_1(t)$, сопровождающего полезный сигнал усилия $U_p(t)$ в условиях эксплуатации, меняется в достаточно большом диапазоне. Это связано с тем, что ШГНУ функционирует в полевых условиях (сильные перепады температур, влажности и т. д.). Кроме того, в процессе функционирования насоса в результате возникновения различных неисправностей также формируется помеха $\varepsilon_2(t)$, которая имеет корреляцию с сигналом $U_p(t)$ [12]. Следовательно, помеха $\varepsilon(t)$, сопровождающая сигнал усилия $U_p(t)$, формируется под влиянием двух факторов:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t),$$

где составляющая $\varepsilon_1(t)$ вызвана влиянием изменения окружающей среды (перепады температур, влажности и т. д.); $\varepsilon_2(t)$ формируется при эксплуатации объекта в результате изменения технического состояния механических узлов насоса (износа, изгиба, трещины, усталости и т. д.).

Таким образом, в процессе эксплуатации объектов на вход системы поступает сигнал, имеющий в аналоговой форме вид

$$g(t) = U_p(t) + \varepsilon(t),$$

а в цифровой форме — следующий вид:

$$g(i\Delta t) = U_p(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t). \quad (1)$$

Здесь как амплитуда, так и спектр помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ меняются в довольно большом диапазоне. При этом погрешности полученных оценок корреляционных функций $R_{gg}(i\Delta t)$ измерительного сигнала $g(i\Delta t) = U_p(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$ с течением времени также меняется в большом диапазоне. Поэтому обеспечить условие робастности оценок корреляционной функции в реальном масштабе времени, т. е. исключить зависимость полученных результатов от влияния помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ не удастся. Это, в свою очередь, затрудняет решение задач идентификации динамограммы с применением корреляционных методов. Следовательно, требуется выполнение условия робастности, т. е. устранение влияния указанных факторов на погрешность оценок $R_{gg}(i\Delta t)$. Для этого, прежде всего, необходимо привести оценки $R_{gg}(i\Delta t)$ к единой безразмерной величине путем применения процедуры нормирования [2, 12—14]. Проведенный анализ показывает, что при применении традиционных методов нормирования в оценки корреляционных функций $r_{gg}(i\Delta t)$ вносится дополнительная погрешность, что затрудняет обеспечение адекватности результатов решения вышеуказанных задач.

Действительно, нормированные корреляционные функции полезного сигнала $U_p(i\Delta t)$ вычисляются по формуле [12—14]

$$r_{UU}(\mu) = R_{UU}(\mu)/D_U, \quad (2)$$

где оценка дисперсии $R_{UU}(\mu)$ при $\mu = 0$ определяется выражением

$$R_{UU}(\mu = 0) = D_U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)U(i\Delta t). \quad (3)$$

Оценка корреляционной функции $R_{UU}(\mu)$ полезного сигнала $U_p(i\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ определяется по формуле

$$R_{UU}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t), \mu = 0, 1, 2, 3. \quad (4)$$

Оценки нормированных корреляционных функций $r_{gg}(\mu)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$, состоящего из суммы сигнала усиления $U_p(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, определяются по формуле

$$r_{gg}(\mu) = R_{gg}(\mu)/D_g, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t) + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)][U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t)U(i\Delta t) + \\ &+ [U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)]]. \quad (6) \end{aligned}$$

Из выражения (6) следует, что при $\mu = 0$ и $\mu \neq 0$ будут выполняться соответственно следующие равенства:

$$R_{gg}(\mu = 0) = D_g, \dots, R_{gg}(\mu) = R_{UU}(\mu).$$

Таким образом, при применении формулы (5) только при $\mu = 0$ получается правильный результат, а в остальных случаях, когда $\mu \neq 0$, в полученный результат вносится дополнительная погрешность. Для устранения данной погрешности целесообразно процедуру нормирования оценок $r_{gg}(\mu \neq 0)$ осуществлять по формуле

$$r_{gg}(\mu) = \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{UU}(\mu = 0)}. \quad (7)$$

Однако из-за влияния помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ определение оценки $R_{UU}(\mu = 0)$ практически невозможно.

В данной работе для обеспечения адекватности идентификации технического состояния ШГНУ по корреляционным функциям ставится задача разработки технологии, ориентированной на устранение влияния помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ на оценки нормированных корреляционных функций $r_{gg}(\mu \neq 0)$, причем требуется получить такие робастные оценки нормированных корреляционных функций $r_{gg}^R(\mu)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, которые обеспечивают равенство

$$r_{gg}^R(\mu) \approx r_{UU}(\mu).$$

Как было указано выше, при зарождении скрытого периода неисправности ШГНУ между полезным сигналом $U_p(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает корреляция. Проведенные экспериментальные исследования показали, что только при нормальном состоянии ШГНУ влияние помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ на оценки корреляционных функций практически отсутствует. При различных видах неисправностей ШГНУ влияние помехи на оценки $R_{gg}(\mu)$ меняется, т. е. каждой возможной неисправности соответствует определенный диапазон оценки дисперсии помехи D_ε , взаимно корреляционной функции $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$ между сигналом усиления $U_p(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, а также оценки суммарной помехи $D_{\varepsilon\varepsilon}$.

Технология коррекции погрешностей процедуры нормирования корреляционных функций

Как было указано выше, при вычислении оценок нормированных корреляционных функций возникают определенные трудности. Принимая во внимание, что при $\mu = 0$ на погрешность оценки $R_{gg}(\mu = 0)$ влияет наличие корреляции между полезным сигналом $U_p(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, а также используя формулу (1), равенство (6) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U^2(i\Delta t) + 2\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) = \\ &= R_{UU}(\mu = 0) + 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + D_\varepsilon. \quad (8) \end{aligned}$$

При этом оценка дисперсии D_ε помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ [12—14] определяется по формуле

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t). \quad (9)$$

Учитывая равенства (8) и (9), формулу для вычисления $R_{UU}(\mu = 0)$ можно представить в виде

$$R_{UU}(\mu = 0) = R_{gg}(\mu = 0) - [2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + D_\varepsilon] = D_g - D_{\varepsilon\varepsilon}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой оценка автокорреляционной функции $R_{gg}(\mu = 0)$ содержит погрешность, равную суммарной дисперсии $D_{\varepsilon\varepsilon}$, т. е.

$$D_{\varepsilon\varepsilon} = 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + D_\varepsilon. \quad (11)$$

В то же время при $\mu \neq 0$ выражение (6) также можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu \neq 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i + \mu)\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][U((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon((i + \mu)\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t) + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t). \end{aligned} \quad (12)$$

Принимая во внимание, что при $\mu \neq 0$ имеют место равенства

$$\begin{cases} R_{U\varepsilon}(\mu) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon U}(\mu) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t) \approx 0, \end{cases} \quad (13)$$

можно написать

$$R_{gg}(\mu \neq 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) = R_{UU}(\mu \neq 0). \quad (14)$$

Следовательно, принимая во внимание соотношения (10)—(14), формулу (7) вычисления оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ можно представить в виде

$$r_{gg}^R(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 0)}{D_g} = 1; \quad (15)$$

$$r_{gg}^R(\mu \neq 0) = \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{R_{UU}(\mu = 0)} \approx \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D_g - 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) - D_\varepsilon}. \quad (16)$$

Таким образом, с применением выражений (15) и (16) устраняется дополнительная погрешность нормированных корреляционных функций, если уметь оценить дисперсию помехи D_ε и корреляционную функцию $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$ полезного сигнала $U(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$.

Метод оценки дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции полезного сигнала и помехи

Как было указано выше, с помощью оценок дисперсии помехи D_ε , взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой $R_{U\varepsilon}(\mu)$ и дисперсии суммарной помехи $D_{\varepsilon\varepsilon}$ можно решить задачу идентификации динамограммы. В связи с этим рассмотрим один из возможных вариантов определения этих оценок.

Формулу вычисления оценки автокорреляционной функции $R_{gg}(\mu)$ центрированного дискретного случайного сигнала $g(i\Delta t)$ с учетом влияния помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i + \mu)\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][U((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon((i + \mu)\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) + U(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t) + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t)] = \\ &= R_{UU}(\mu) + \lambda_1(\mu), \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$R_{UU}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t). \quad (18)$$

Известно, что когда отсчеты полезного сигнала $U(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, а также отсчеты помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\varepsilon((i + \mu)\Delta t)$ не коррелируют между собой, то имеют место равенства (13).

С учетом (9) и (13) равенства (17) можно записать в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t)U(i\Delta t) + U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)U(i\Delta t)] + D_\varepsilon \approx R_{UU}(\mu = 0) + D_\varepsilon; \\ R_{gg}(\mu \neq 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t) + \\ &+ U(i\Delta t)\varepsilon((i + \mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)U((i + \mu)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{UU}(\mu \neq 0). \end{aligned} \quad (19)$$

Известно [12—15], что если по выражению (18) найти оценки $R_{UU}(\mu = 0)$, $R_{UU}(\mu = 1)$ и $R_{UU}(\mu = 2)$, то их разности будут близкими величинами:

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} R_{UU}(\mu = 0) - R_{UU}(\mu = 1) &\approx \\ \approx \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} R_{UU}(\mu = 1) - R_{UU}(\mu = 2). \end{aligned} \quad (20)$$

Поэтому справедливо равенство

$$\begin{aligned} R_{UU}(\mu = 0) - R_{UU}(\mu = 1) &\approx \\ \approx R_{UU}(\mu = 1) - R_{UU}(\mu = 2), \end{aligned} \quad (21)$$

и можно записать

$$R_{UU}(\mu = 0) \approx 2R_{UU}(\mu = 1) - R_{UU}(\mu = 2). \quad (22)$$

Если принять во внимание равенства

$$\begin{cases} R_{gg}(\mu = 1) \approx R_{UU}(\mu = 1); \\ R_{gg}(\mu = 2) \approx R_{UU}(\mu = 2), \end{cases} \quad (23)$$

то с учетом (17), (19), (21)—(23) получим

$$D_{\varepsilon\varepsilon} \approx R_{gg}(\mu = 0) + R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1). \quad (24)$$

Иначе говоря, при выполнении условий (13), (20)—(23) выражение определения оценки суммарной помехи $D_{\varepsilon\varepsilon}$ можно представить в виде [7, 12, 15]

$$D_{\varepsilon\varepsilon} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)]. \quad (25)$$

Зная оценку $D_{\varepsilon\varepsilon}$, формулу для вычисления дисперсии полезного сигнала D_U можно представить в виде

$$D_U = D_g - D_{\varepsilon\varepsilon}.$$

Далее, в выражении (17) оценку $R_{gg}(\mu = 0)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)]^2 = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U^2(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_2(i\Delta t). \end{aligned} \quad (26)$$

Вводя обозначения

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U^2(i\Delta t) &= R_{UU}(\mu = 0), \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)] &= 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0), \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) &= R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) = D_{\varepsilon\varepsilon}, \end{aligned}$$

выражение (26) можно записать в виде

$$R_{gg}(\mu = 0) = R_{UU}(\mu = 0) + 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$$

и выражение (24) привести к виду

$$D_{\varepsilon\varepsilon} = R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1) + R_{UU}(\mu = 0) + 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0).$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 1) &= R_{UU}(\mu = 1), \\ R_{gg}(\mu = 2) &= R_{UU}(\mu = 2); \end{aligned}$$

$$R_{UU}(\mu = 0) + R_{UU}(\mu = 2) = 2R_{UU}(\mu = 1),$$

можно убедиться в справедливости равенства

$$R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1) + R_{UU}(\mu = 0) = 0.$$

В результате формулы (24) и (25) для вычисления $D_{\varepsilon\varepsilon}$ можно привести к виду

$$D_{\varepsilon\varepsilon} = 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) = 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0) + D_{\varepsilon}, \quad (27)$$

По выражению (25) можно вычислить оценку $D_{\varepsilon\varepsilon}$. Однако применение этой формулы не позволяет найти оценку $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$ и D_{ε} . Рассмотрим более подробно возможность их определения с помощью технологии вычисления оценок релейных корреляционных функций $R_{gg}^*(\mu = 0)$. Принимая обозначения

$$\text{sgn } g(i\Delta t) = \text{sgn } U(i\Delta t) = \begin{cases} +1 & \text{при } g(i\Delta t) > 0; \\ 0 & \text{при } g(i\Delta t) = 0; \\ -1 & \text{при } g(i\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (28)$$

и допуская равенства

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i+\mu) = 0 & \text{при } \mu \neq 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0 & \text{при } \mu = 0, \end{cases} \quad (29)$$

формулу определения оценок корреляционной функции $R_{gg}^*(\mu = 0)$ представим в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)[U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)[U(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [[\text{sgn } g(i\Delta t)U(i\Delta t)] + [\text{sgn } g(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)]] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)U(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } U(i\Delta t)U(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } U(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) = \\ &= R_{UU}^*(\mu = 0) + R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0). \end{aligned} \quad (30)$$

Из литературы [7, 12, 15] известно, что при отсутствии корреляции между $U(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ с учетом условий (28), (29) для оценок релейной корреляционной функции справедливы следующие приближенные равенства:

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu = 0) - R_{gg}^*(\mu = 1) &\approx R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu = 2) - R_{gg}^*(\mu = 3) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu = 3) - R_{gg}^*(\mu = 4); \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} R_{UU}^*(\mu = 0) - R_{UU}^*(\mu = 1) &\approx R_{UU}^*(\mu = 1) - R_{UU}^*(\mu = 2) \approx \\ &\approx R_{UU}^*(\mu = 2) - R_{UU}^*(\mu = 3) \approx \\ &\approx R_{UU}^*(\mu = 3) - R_{UU}^*(\mu = 4); \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{gg}^*(\mu = 0) &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \approx \\ &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 3); \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{UU}^*(\mu = 0) &\approx \Delta R_{UU}^*(\mu = 1) \approx \\ &\approx \Delta R_{UU}^*(\mu = 2) \approx \Delta R_{UU}^*(\mu = 3). \end{aligned} \quad (34)$$

В то же время для случая, когда имеет место корреляция между $U(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$, справедливы следующие выражения:

$$\Delta R_{gg}^*(\mu = 0) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \neq \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 2); \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 4) &\approx 0; \\ \Delta R_{UU}^*(\mu = 1) - \Delta R_{UU}^*(\mu = 2) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 4) &\approx 0. \end{aligned} \right.$$

Из равенства (30) следует, что оценку релейной взаимно корреляционной функции $\Delta R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)$ можно определить по формуле

$$\Delta R_{gg}^*(\mu = 0) \approx \Delta R_{UU}^*(\mu = 0) + \Delta R_{U\varepsilon}^*(\mu = 1);$$

$$\Delta R_{U\varepsilon}^*(0) \approx R_{gg}^*(\mu = 0) - R_{UU}^*(\mu = 0). \quad (36)$$

Следовательно, для вычисления $R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)$ по выражению (36) необходимо определить $R_{UU}^*(\mu = 0)$.

Из равенств (30)–(35) следует, что оценку $R_{UU}^*(\mu = 0)$ можно вычислить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} R_{UU}^*(\mu = 0) &\approx R_{UU}^*(\mu = 1) + \Delta R_{UU}^*(\mu = 1) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu = 1) + \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \approx R_{gg}^*(\mu = 1) + \\ + [R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2)] &= 2R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2). \end{aligned}$$

Таким образом, выражение (36) можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0) &= R_{gg}^*(\mu = 0) - [2R_{gg}^*(\mu = 0) - \\ - R_{gg}^*(\mu = 2)] &= R_{gg}^*(\mu = 0) - 2R_{gg}^*(\mu = 1) + R_{gg}^*(\mu = 2). \end{aligned}$$

Следовательно, выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)$ между полезным сигналом $U(i\Delta t)$ и ее помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g(i\Delta t) - \\ - 2\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) &+ \operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)]. \quad (37) \end{aligned}$$

Легко убедиться, что по оценке $R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)$ можно вычислить оценку $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$. Из литературы [12–15] известно следующее соотношение между оценками:

$$\frac{R_{gg}^*(\mu = 1)}{R_{gg}(\mu = 1)} = \frac{R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)}{R_{U\varepsilon}(\mu = 0)},$$

из которого можно определить оценку $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$:

$$R_{U\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)}{R_{gg}^*(\mu = 1)}. \quad (38)$$

Располагая оценкой $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$, из выражения (27) находим оценку D_ε :

$$D_\varepsilon = D_{\varepsilon\varepsilon} - 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0).$$

Подставляя найденные значения дисперсии помехи D_ε и корреляционной функции $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$ полезного сигнала и помехи в выражения (15) и (16), получим робастные нормированные оценки автокорреляционных функций $r_{gg}^R(\mu)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$.

Алгоритм робастного нормирования оценок корреляционных функций

Технология вычисления оценок $D_{\varepsilon\varepsilon}$, D_ε , $R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)$, $R_{U\varepsilon}(\mu = 0)$ открывает возможность за счет исключения дополнительной погрешности от влияния помех обеспечить робастность оценок нормированных корреляционных функций. Предлагается следующий алгоритм нормирования корреляционных функций.

1. По выражениям (17) вычисляются оценки автокорреляционной функции зашумленного сигнала

$$R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t).$$

2. В соответствии с выражением (30) вычисляется оценка релейной автокорреляционной функции зашумленного сигнала при $\mu = 1$:

$$R_{gg}^*(\mu = 1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t).$$

3. По выражению (37) вычисляется оценка релейной взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой при $\mu = 0$:

$$\begin{aligned} R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g(i\Delta t) - \\ - 2\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) &+ \operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)]. \end{aligned}$$

4. По выражению (38) вычисляется оценка взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой при $\mu = 0$:

$$R_{U\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R_{U\varepsilon}^*(\mu = 0)}{R_{gg}^*(\mu = 1)}.$$

5. По выражениям (25) и (27) вычисляется оценка дисперсии суммарной помехи $D_{\varepsilon\varepsilon}$ и дисперсия помехи D_ε :

$$\begin{aligned} D_{\varepsilon\varepsilon} &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - \\ - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)], \\ D_\varepsilon &= D_{\varepsilon\varepsilon} - 2R_{U\varepsilon}(\mu = 0). \end{aligned}$$

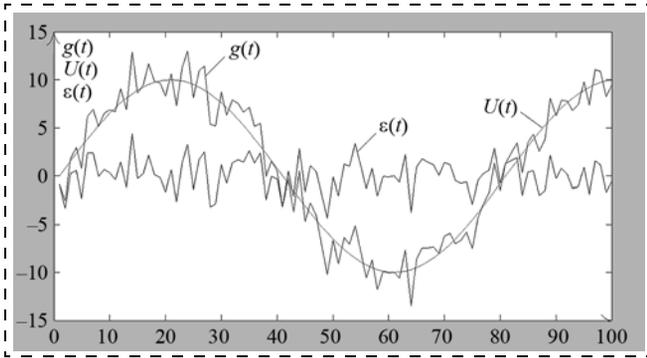


Рис. 2. Изменение полезного $U(i\Delta t)$, зашумленного $g(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ сигналов во времени

6. По выражениям (15) и (16) вычисляются робастные оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала при $\mu = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$r_{gg}^R(\mu) = \begin{cases} \frac{R_{gg}(\mu=0)}{D_g} = 1 \text{ при } \mu = 0; \\ \frac{R_{gg}(\mu)}{D_g - 2R_{U\varepsilon}(0) - D_\varepsilon} \text{ при } \mu \neq 0. \end{cases}$$

Данный алгоритм позволяет вычислить свободные от погрешностей робастные оценки нормированной автокорреляционной функции $r_{gg}^R(\mu)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$. Простота предложенного алгоритма иллюстрируется следующим численным примером.

Положим, что для зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$, представляющего собой аддитивную смесь полезного синусоидального сигнала $U(i\Delta t) = A \sin(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ (рис. 2), выполняется условие $D_{\varepsilon\varepsilon} \approx 0,1D_U$.

На графике рис. 2 приведены первые 100 отсчетов сигналов $g(i\Delta t)$, $U(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$. Полезный сигнал $U(i\Delta t)$ формировался в виде синусоиды с амплитудой 10, временным диапазоном от $t_{\min} = 0$ до $t_{\max} = 120\pi - \pi/40$ и шагом дискретизации $\pi/40$. Помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ создавалась с помощью функции MATLAB `normrnd(0, 2, 1, 4800)`, предназначенной для генерации псевдослучайных чисел по нормальному закону.

По формулам (8) и (9)

$$D_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t), \quad D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)$$

вычисляем оценки дисперсии зашумленного сигнала и помехи:

$$D_g = 55,229, \quad D_\varepsilon = 3,9064.$$

Далее по выражению (25) определяем оценку $D_{\varepsilon\varepsilon} = 3,8508$.

Затем по формулам (2), (3) и (4) выполняем процедуру нормирования

$$r_{UU}(\mu) = \frac{R_{UU}(\mu)}{D_U}$$

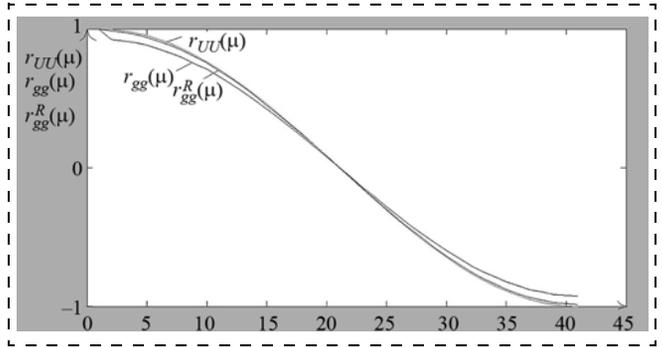


Рис. 3. Графики нормированных корреляционных функций зашумленного сигнала $r_{gg}(\mu)$ и полезного сигнала $r_{UU}(\mu)$, а также робастной корреляционной функции зашумленного сигнала $r_{gg}^R(\mu)$

и строим график ее зависимости от $\mu = 0, 1, 2, 3, \dots$ (рис. 3).

По формуле (5) выполняем процедуру нормирования

$$r_{gg}(\mu) = \frac{R_{gg}(\mu)}{D_g}$$

и строим график $r_{gg}(\mu)$ (рис. 3).

По формуле (16) с учетом (27) выполняем процедуру нормирования

$$r_{gg}^R(\mu) = \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D_g - 2R_{U\varepsilon}(\mu=0) - D_\varepsilon} = \frac{R_{gg}(\mu)}{D_g - D_{\varepsilon\varepsilon}}$$

и строим ее график (рис. 3).

В табл. 1 сведены результаты полученных оценок $r_{UU}(\mu)$, $r_{gg}(\mu)$, $r_{gg}^R(\mu)$ в зависимости от значения μ .

Таблица 1
Результаты оценок $r_{UU}(\mu)$, $r_{gg}(\mu)$, $r_{gg}^R(\mu)$ в зависимости от значения μ

μ	$r_{UU}(\mu)$	$r_{gg}(\mu)$	$r_{gg}^R(\mu)$	μ	$r_{UU}(\mu)$	$r_{gg}(\mu)$	$r_{gg}^R(\mu)$
0	1	1	1	21	-0,0731	-0,0663	-0,0707
1	0,9973	0,9261	0,9873	22	-0,1512	-0,1395	-0,1488
2	0,9885	0,9145	0,9749	23	-0,2282	-0,2111	-0,2250
3	0,9736	0,9027	0,9623	24	-0,3039	-0,2807	-0,2992
4	0,9527	0,8827	0,9410	25	-0,3777	-0,3507	-0,3739
5	0,9259	0,8549	0,9114	26	-0,4492	-0,4158	-0,4433
6	0,8934	0,8266	0,8812	27	-0,5179	-0,4775	-0,5090
7	0,8554	0,7913	0,8436	28	-0,5835	-0,5378	-0,5733
8	0,8121	0,7495	0,7990	29	-0,6454	-0,5961	-0,6355
9	0,7639	0,7096	0,7564	30	-0,7033	-0,6499	-0,6929
10	0,7109	0,6575	0,7009	31	-0,7569	-0,7017	-0,7480
11	0,6535	0,6053	0,6452	32	-0,8059	-0,7465	-0,7958
12	0,5921	0,5484	0,5846	33	-0,8498	-0,7843	-0,8361
13	0,5270	0,4872	0,5194	34	-0,8886	-0,8220	-0,8763
14	0,4587	0,4232	0,4511	35	-0,9218	-0,8524	-0,9087
15	0,3876	0,3575	0,3811	36	-0,9494	-0,8786	-0,9366
16	0,3141	0,2897	0,3089	37	-0,9711	-0,8963	-0,9555
17	0,2386	0,2198	0,2343	38	-0,9868	-0,9121	-0,9724
18	0,1617	0,1509	0,1609	39	-0,9965	-0,9202	-0,9810
19	0,0838	0,0784	0,0836	40	-1,0000	-0,9252	-0,9863
20	0,0053	0,0062	0,0066				

Как видно, графики $r_{UU}(\mu)$ и $r_{gg}^R(\mu)$ практически совпадают, а график $r_{gg}(\mu)$ из-за неробастности традиционной процедуры нормирования значительно отличается от истинных значений $r_{UU}(\mu)$. Итак, целесообразность практического применения предложенной процедуры нормирования очевидна.

Процедура определения информативных признаков для диагностики технического состояния ШГНУ

Эксперименты на реальных объектах нефтяных промыслов показали, что по нормированным корреляционным функциям сигнала усиления $U_p(i\Delta t)$, которое определяется выражениями (15) и (16), можно формировать до двенадцати информативных признаков. Было выявлено, что информативные признаки, полученные по Noise-технологии, с использованием по выражениям (25), (27) и (38), также позволяют осуществить идентификацию технического состояния ШГНУ. Ниже приводится порядок определения информативных признаков по нормированным корреляционным функциям. Сначала значение периода качания T_{ST} разбивается на восемь равных временных интервалов

$$\Delta T_{ST} = \frac{T_{ST}}{8}.$$

Далее по формулам (15) и (16) вычисляются оценки корреляционных функций $r_{gg}^R(\mu = 0)$, $r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST})$, $r_{gg}^R(\mu = 2\Delta T_{ST})$, ..., $r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST})$, а по формулам

$$\begin{aligned} \Delta r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST}) &= r_{gg}^R(\mu = 0) - r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST}); \\ \Delta r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST}) &= r_{gg}^R(\mu = 2\Delta T_{ST}) - r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST}); \\ \Delta r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST}) &= r_{gg}^R(\mu = 4\Delta T_{ST}) - r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST}); \\ \Delta r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST}) &= r_{gg}^R(\mu = 6\Delta T_{ST}) - r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST}) \end{aligned}$$

определяются их разности.

Затем вычисляются минимальное значение нормированной корреляционной функции зашумленного сигнала $r_{gg}^{\min}(\mu)$ и соответствующее ему значение μ_{\min} . После этого определяются информативные признаки в виде следующих коэффициентов:

$$\begin{aligned} K_{N1} &= \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST})}{\Delta T_{ST}}; K_{N2} = \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST})}{\Delta T_{ST}}; \\ K_{N3} &= \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST})}{\Delta T_{ST}}; K_{N4} = \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST})}{\Delta T_{ST}}; \\ K_{N5} &= \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST})}; K_{N6} = \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST})}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{N7} &= \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 1\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST})}; K_{N8} = \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST})}; \\ K_{N9} &= \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 3\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST})}; K_{N10} = \frac{\Delta r_{gg}^R(\mu = 5\Delta T_{ST})}{\Delta r_{gg}^R(\mu = 7\Delta T_{ST})}; \end{aligned}$$

$$K_{N11} = r_{gg}^{\min}(\mu); K_{N12} = \mu_{\min}.$$

Кроме того, по оценкам дисперсий помехи D_{ε} , суммарного сигнала D_g , суммарной помехи $D_{\varepsilon\varepsilon}$ и взаимно корреляционной функции $R_{U\varepsilon}(\mu)$ определяются информативные признаки в виде коэффициентов

$$K_{\varepsilon 1} = \frac{D_{\varepsilon\varepsilon}}{D_g}; K_{\varepsilon 2} = \frac{D_{\varepsilon}}{D_{\varepsilon\varepsilon}}; K_{\varepsilon 3} = \frac{R_{U\varepsilon}(\mu)}{D_{\varepsilon\varepsilon}}.$$

Таким образом, информативные признаки K_{N1}, \dots, K_{N12} нормированной корреляционной функции позволяют осуществить идентификацию технического состояния ШГНУ. Одновременно коэффициенты $K_{\varepsilon 1}, K_{\varepsilon 2}, K_{\varepsilon 3}$ позволяют дублировать идентификацию технического состояния ШГНУ.

Система диагностики технического состояния ШГНУ в реальном масштабе времени

Как было указано выше, для обеспечения эффективной эксплуатации ШГНУ необходимо осуществление непрерывного контроля параметров и диагностики технического состояния объекта в реальном масштабе времени.

На рис. 4 приведена структурная схема системы диагностики и управления ШГНУ, состоящая из трех уровней.

1. *Уровень глубинно-насосной установки*, состоящей из плунжерного глубинного насоса 1, плунжера 2, насосных труб 3, штанг 4, полированного штока 5, головки балансира 6, балансира 7, шатуна 8, кривошипного противовеса 9, редуктора 10, клиноремной передачи 11, электродвигателя 12, балансириного противовеса 13, датчика усилия 14, датчика устьевого давления 15, датчика угла поворота 16, кривошипа станка качалки 17.

2. *Уровень станции робастного управления (СРУ)* (внешний вид станции на станке-качалке представлен на рис. 5), состоящей из контроллера для сбора информации от датчиков усилия 14; устьевого давления 15 и угла поворота 16; преобразователя частоты для управления скоростью электродвигателя; радиомодема с антенной для осуществления информационного обмена СРУ, установленного непосредственно у скважины с централизованным диспетчерским пунктом; межблочных кабелей с интерфейсом RS 485.

3. *Уровень централизованного диспетчерского пункта нефтяного промысла*, обслуживающего до 200 скважин, который состоит из промышленного компьютера и радиомодема с антенной.

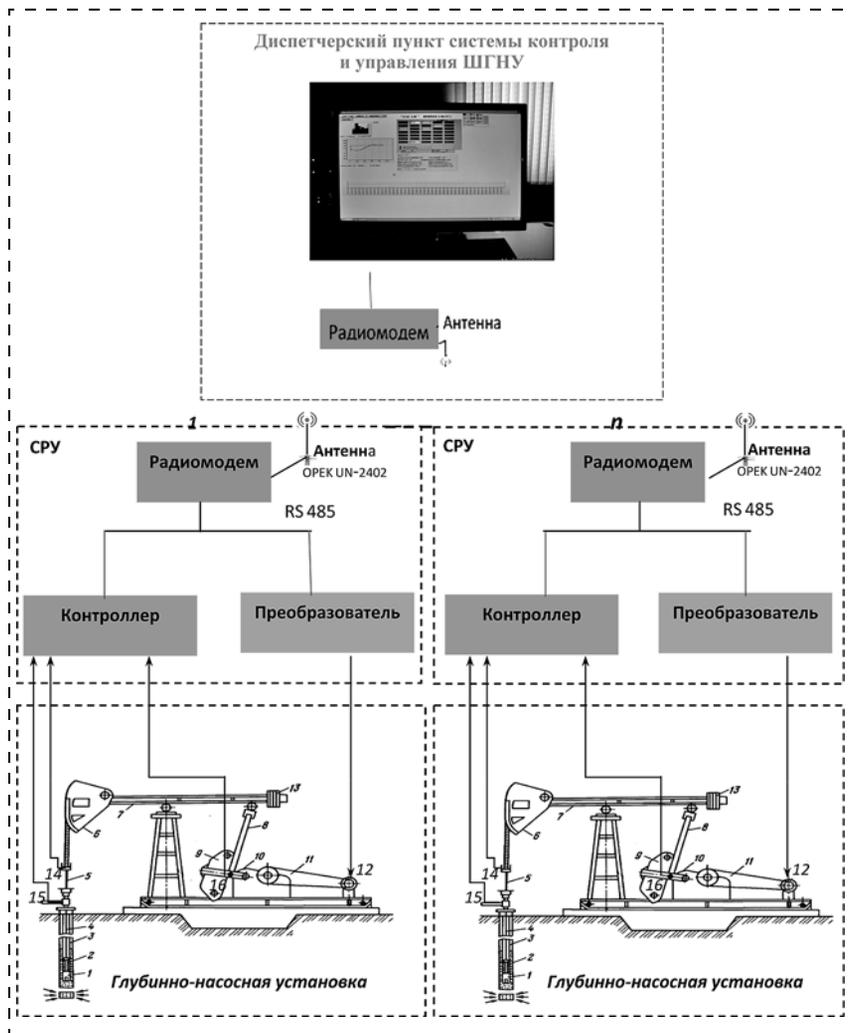


Рис. 4. Структурная схема системы диагностики и управления ШГНУ

Для диагностики состояния ШГНУ в системе используется сочетание технологий идентификации динамограммы по оценкам нормированных корреляционных функций и Noise-характеристик сигнала



Рис. 5. Внешний вид СРУ на станке-качалке установки ШГНУ

усилия. Для их реализации в робастной системе диагностики и управления ШГНУ, исходя из длительности интервала периода качания T_{ST} , был определен шаг дискретизации сигнала усилия $U_p(i\Delta t)$: для большинства нефтяных скважин $T_{ST} = 5...20$ с. При этом экспериментально установлено, что для получения устойчивых нормированных оценок корреляционной функции $r_{gg}^R(\mu)$ с необходимой точностью достаточно сигнал усилия дискретизировать с частотой $f = 500...1000$ Гц при числе отсчетов $U(i\Delta t)$ $n \geq 1024$.

Экспериментально установлено, что за период качания T_{ST} любое незначительное изменение технического состояния ШГНУ отражается на значении оценки нормированных корреляционных функций сигнала усилия $U_p(i\Delta t)$. Это, в свою очередь, приводит к изменению информативных признаков $K_{N1}...K_{N12}$ и $K_{\epsilon 1}, K_{\epsilon 2}, K_{\epsilon 3}$.

В результате процесса эксплуатации ШГНУ для ее различных технических состояний легко формируются соответствующие комбинации этих коэффициентов (табл. 2). Благодаря этому они позволяют осуществить надежную идентификацию сигнала усилия $U_p(i\Delta t)$, т. е. технического состояния ШГНУ в реальном масштабе времени (табл. 2).

Следовательно, идентификация аварийных состояний ШГНУ сводится к поиску соответствующих комбинаций нормированных коэффициентов K_{N1}, \dots, K_{N10} . Благодаря этому отпадает необходимость визуальной интерпретации динамограммы для определения возникшей неисправности ШГНУ.

Для иллюстрации возможности рассматриваемого варианта идентификации в реальной промышленной практике на рис. 6 приведены восемь наиболее часто встречаемых видов неисправностей.

В табл. 2 и 3 приведены комбинации соответствующих оценок нормированных коэффициентов, римскими цифрами обозначены *виды неисправностей*:

- I — выход из строя нагнетательной части насоса;
- II — выход из строя приемной части насоса;
- III — прихват плунжера;
- IV — откачка уровня;
- V — высокая посадка плунжера насоса;
- VI — большой процент утечки в нагнетательной части насоса;
- VII — утечка в приемной части насоса;
- VIII — большой процент утечки,

а для информативных признаков приняты следующие обозначения:

$$K_{N1}: r_{gg}^R(\mu = 1)/\Delta T_{ST}; K_{N2}: r_{gg}^R(\mu = 3)/\Delta T_{ST};$$

$$K_{N3}: r_{gg}^R(\mu = 5)/\Delta T_{ST}; K_{N4}: r_{gg}^R(\mu = 7)/\Delta T_{ST};$$

$$K_{N5}: r_{gg}^R(\mu = 1)/r_{gg}^R(\mu = 3); K_{N6}: r_{gg}^R(\mu = 1)/r_{gg}^R(\mu = 5);$$

$$K_{N7}: r_{gg}^R(\mu = 1)/r_{gg}^R(\mu = 7); K_{N8}: r_{gg}^R(\mu = 3)/r_{gg}^R(\mu = 5);$$

$$K_{N9}: r_{gg}^R(\mu = 3)/r_{gg}^R(\mu = 7); K_{N10}: r_{gg}^R(\mu = 5)/r_{gg}^R(\mu = 7);$$

$$K_{N11}: r_{gg\min}^R; K_{N12}: \mu_{\min}.$$

Для повышения достоверности идентификация технического состояния ШГНУ дублируется с при-

Таблица 2

Вид неисправности	Информативные признаки					
	K_{N1}	K_{N2}	K_{N3}	K_{N4}	K_{N5}	K_{N6}
I	0,058302	0,021427	-0,020932	0,062865	2,7209	2,7853
II	0,042181	0,02277	-0,0067786	0,043884	1,8525	-6,2226
III	0,072276	0,024799	-0,037473	-0,071132	2,9145	-1,9288
IV	0,056666	0,043252	0,0013712	-0,053839	1,3101	41,325
V	0,055614	0,011688	-0,025684	-0,06399	4,7581	-2,1653
VI	0,064761	0,0021131	-0,04916	-0,056753	30,647	-1,3173
VII	0,061186	0,032006	-0,014403	-0,058085	1,9117	-4,2481
VIII	0,058415	0,034291	-0,0071802	-0,050712	1,7035	-8,1357

Таблица 3

Вид неисправности	Информативные признаки					
	K_{N7}	K_{N8}	K_{N9}	K_{N10}	K_{N11}	K_{N12}
I	-0,92741	-1,0236	-0,34084	0,33297	-0,9189	99
II	-0,96119	-3,3591	-0,51887	0,15447	-0,8189	104
III	-1,0161	-0,66178	-0,34863	0,52681	-0,92938	94
IV	-1,0525	31,5430	-0,80337	-0,025469	-0,90529	104
V	-0,8691	-0,45508	-0,18266	0,40137	-0,83869	94
VI	-1,1411	-0,042985	-0,037234	0,86621	-0,7803	81
VII	-1,0534	-2,2221	-0,55101	0,24796	-0,89677	104
VIII	-1,1519	-4,7758	-0,67620	0,14159	-0,84584	104

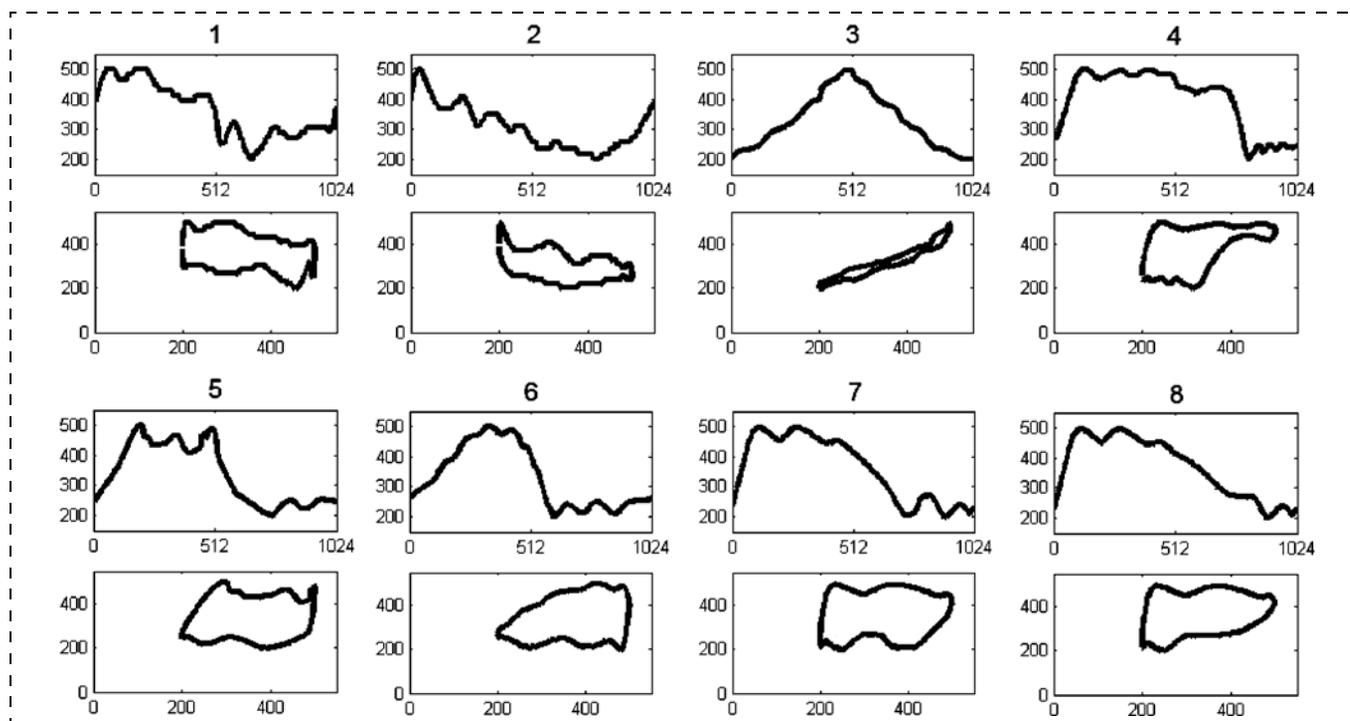


Рис. 6. Шаблоновые кривые усилия и динамограммы

менением Noise-технологии. Для этой цели применяется технология вычисления взаимно корреляционной функции $R_{U_\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $U_p(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ по выражениям (25), (27), (37), (38). Многочисленные эксперименты показали, что при нормальном состоянии оценка взаимно корреляционной функции $R_{U_\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом и помехой равна нулю. При зарождении любой неисправности оценка $R_{U_\varepsilon}(\mu = 0)$ отличается от нуля. Благодаря этому при изменении технического состояния ШГНУ в зависимости от влияния помехи, которая формируется в процессе зарождения неисправностей, меняются оценки $K_{\varepsilon 1}, K_{\varepsilon 2}, K_{\varepsilon 3}$, причем каждому из восьми видов приведенных неисправностей соответствует определенная комбинация этих оценок (см. табл. 2).

В полевых условиях эксплуатации многочисленных реальных объектов в процессе функционирования системы по полученным сигналам от датчика усилия 14 (см. рис. 4) в системе за период качания ШГНУ в реальном масштабе времени определяются комбинации нормированных коэффициентов $K_{N1}, K_{N2}, \dots, K_{12}$ и $K_{\varepsilon 1}, K_{\varepsilon 2}, K_{\varepsilon 3}$. Они сравниваются с эталонами, которые были определены предварительно (например, для одного объекта они приведены в табл. 2). По наиболее близкому эталону определяется наиболее вероятная неисправность ШГНУ. Простота вычислений этих коэффициентов позволяет реализовать предлагаемую технологию диагностики с помощью любых современных контроллеров (в нашем случае использовался контроллер LPC 2148 FBD64). Благодаря этому при функционировании ШГНУ по полученным результатам идентификации формируются команды управления объектом, например, меняется длительность времени периода качания. Одновременно информация о состоянии объекта через радиомодем RMD 400 SP4 передается на диспетчерский пункт (см. рис. 4). На экране диспетчерского пункта системы диагностики и управления, когда объект находится в нормальном состоянии, эта информация отражается зеленым цветом, при обнаружении начальной стадии неисправности — желтым цветом, при аварийном состоянии — красным цветом.

При внедрении предложенных технологий на нефтяных промыслах с большим числом скважин поочередно для каждой из них при возникновении всевозможных неисправностей ШГНУ в процессе эксплуатации определяются комбинации соответствующих эталонных коэффициентов. Этот процесс реализуется с участием специалиста-технолога, когда он путем интерпретации динамограммы определяет характер неисправности и регистрирует соответствующие комбинации коэффициентов $K_{N1}, K_{N2}, \dots, K_{12}$ и $K_{\varepsilon 1}, K_{\varepsilon 2}, K_{\varepsilon 3}$ в блоке идентификации системы. Таким образом, в процессе эксплуатации при появлении на каждой скважине определенных неисправностей в блоке идентификации каждой системы формируется комбинация соответствующих эталонных оценок коэффициентов.

Благодаря этому через определенный промежуток времени эксплуатации на узлах идентификации робастных систем диагностики и управления ШГНУ всех скважин формируются и запоминаются комбинации эталонных коэффициентов соответствующих неисправностей. По истечении некоторого времени эксплуатации, когда в блоках идентификации формируются и запоминаются эталоны всевозможных неисправностей ШГНУ, она переводится в автоматический режим диагностики и управления.

На рис. 6 для восьми характерных неисправностей ШГНУ приведены шаблонные кривые усилия $U_p(i\Delta t)$ (вверху) и соответствующие динамограммы (внизу). В табл. 2 приведены комбинации нормированных коэффициентов K_{N1}, \dots, K_{N12} . Очевидно, что на каждой динамограмме соответствует только одна комбинация оценок K_{N1}, \dots, K_{N12} . Также очевидно, что при наличии комбинаций коэффициентов $K_{N1}, K_{N2}, \dots, K_{12}$ однозначно определяются те же самые виды неисправностей, которые обычно специалисты-технологи по динамограмме определяют визуально. Таким образом, комбинации этих коэффициентов позволяют автоматически осуществить идентификацию технического состояния ШГНУ. Для повышения достоверности и надежности результатов идентификации полученный результат сравнивается с комбинацией коэффициентов $K_{\varepsilon 1}$ и $K_{\varepsilon 3}$, которые так же, как информативные признаки, позволяют идентифицировать техническое состояние ШГНУ. Эти оценки для каждого вида неисправностей *a priori* определяются и запоминаются. Благодаря использованию этих коэффициентов происходит дублирование процесса идентификации, что повышает достоверность и надежность функционирования системы.

Заклучение

В настоящее время на старых нефтяных месторождениях при механизированной добыче нефти широко применяется ШГНУ. Однако из-за невозможности диагностики технического состояния ШГНУ в реальном масштабе времени рентабельность длительно эксплуатируемых нефтяных месторождений падает. Поэтому проблема создания новых эффективных технологий и систем диагностики технического состояния ШГНУ имеет как теоретический, так и, в особенности, экономический интерес.

Для контроля технического состояния ШГНУ принимаемый полуавтоматический метод, основанный на интерпретации формы динамограммы, не дает желаемого результата. Это связано с тем, что наличие человеческого фактора в этом способе, с одной стороны, ограничивает время идентификации, с другой стороны, зависит от квалификации специалиста-технолога. Кроме того, с увеличением глубины скважины по форме динамограммы становится затруднительным отличить некоторые виды неисправностей. Анализ показывает, что для этой цели, т. е. для идентификации технического состояния

ШГНУ путем анализа сигнала усилия $U_p(i\Delta t)$, наиболее подходящими методами являются корреляционные и спектральные методы. Однако объект контроля находится в полевых условиях, и изменение климатических условий в большом диапазоне приводит к появлению больших погрешностей полученных результатов. Кроме того, влияние механических процессов, которые возникают при переходе объекта в аварийное состояние, также вызывает помехи, изменяющиеся в большом диапазоне. Под влиянием этих двух факторов при применении как корреляционных, так и спектральных методов не удастся получить адекватные оценки, так как их погрешность меняется под влиянием этих факторов. На первый взгляд, применением фильтрации помехи, сопровождающей полезный сигнал $U_p(i\Delta t)$, можно устранить влияние указанных погрешностей на результат идентификации динамограмм. При стабильном спектре помехи обычно применение технологии фильтрации дает удовлетворительные результаты. Однако в полевых условиях спектр помехи из-за резкого изменения факторов ее формирования меняется в большом диапазоне. Кроме того, дисперсия спектра помехи, которая формируется в результате механических процессов, происходящих на ШГНУ, также меняется в большом диапазоне и нередко пересекается с диапазоном спектра полезного сигнала. По этим причинам при применении технологии фильтрации сигнала усилия не достигается желаемый результат. При этом иногда даже имеет место значительное искажение спектра полезного сигнала. По этим причинам не всегда достигается получение удовлетворительных результатов путем корреляционного или спектрального анализа сигнала усилия с применением процесса фильтрации. Поэтому для решения рассматриваемой задачи в первую очередь необходимо создание технологий определения таких оценок корреляционных и спектральных характеристик, на которые практически не влияют изменения указанных помех.

В работе как теоретически, так и экспериментально установлено, что с помощью нормированных корреляционных функций можно определить нормированные коэффициенты K_{N1} , K_{N2} , ..., K_{N12} , на которые указанные помехи никакого влияния практически не оказывают. Преимущество применения этих коэффициентов заключается в том, что их вычисление легко реализуется на современных контроллерах (например, LPC 2148 FBD64). Благодаря этому появляется возможность диагностики в реальном масштабе времени. При дублировании диагностики ШГНУ с применением коэффициентов $K_{\varepsilon1}$, $K_{\varepsilon2}$, $K_{\varepsilon3}$, полученных по оценкам дисперсии помехи и взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой, а также суммарной дисперсии, повышается надежность и достоверность полученных результатов. Простота реализации этих технологий позволяет создавать простую, надежную и недорогую систему

диагностики и управления ШГНУ, которая была реализована на реальных объектах в Азербайджане. Опыт эксплуатации системы на 35 скважинах Биби-Эйбатского месторождения, на 190 скважинах совместной азербайджано-английской фирмы "Ширван Ойл" и т. д. показал надежность функционирования этих систем. При этом улучшение диагностики и управления ШГНУ позволило эксплуатировать скважины в адекватном режиме и за счет экономии электрической энергии и увеличения межремонтного периода значительно повысить их рентабельность. Например, на Биби-Эйбатском нефтяном промысле экономия электроэнергии оказалась более 50 % и межремонтный период был продлен более чем на 30 %.

Отметим, что на основе опыта эксплуатации вышеуказанных систем было установлено, что на каждом промысле для скважин с одинаковой глубиной диапазон изменения одних и тех же коэффициентов K_{N1} , ..., K_{N12} и $K_{\varepsilon1}$, $K_{\varepsilon2}$, $K_{\varepsilon3}$ при одних и тех же неисправностях незначителен (не более 5...10 %). Вследствие этого, определяя комбинации этих коэффициентов при соответствующих неисправностях для одной скважины, их можно использовать в системах контроля других скважин приблизительно той же глубины. Если учесть, что в большинстве случаев для каждого старого месторождения характерны приблизительно одинаковые глубины спуска насоса, становится очевидным, что формирование эталонной базы комбинаций коэффициентов в системах диагностики и управления не займет много времени.

Список литературы

1. Андреев В. В., Уразаков К. Р., Далимов В. У., Сахибгареев Р. Ш. Справочник по добыче нефти / Под ред. К. Р. Уразакова. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 374 с.
2. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Автоматический контроль и диагностика СШНУ. М.: Недра, 1988. 232 с.
3. Neely A. B., Tolbert H. E. Experience with Pump-Off Control in the Permian Basin SPE Paper No. 14345 // SPE Technical Conference and Journal of Petroleum Technology. May 1988. P. 645–648.
4. Нусратов О. К., Гулуев Г. А., Рзаев А. Г., Пашаев Ф. Г., Юсифов И. Б., Ризванов М. Г. Информационный комплекс измерения, мониторинга, диагностики и управления для нефтяных скважин, эксплуатирующихся штанговыми, глубинно-насосными установками // Известия НАНА. Серия физико-технических и математических наук. 2009. Т. XXIX. № 6. С. 176–183.
5. Neely A. B., Gibbs S. G. Computer Diagnosis of Downhole Conditionis in Soker Rod Pumping Wells // Journal of Petroleum Technology. January 1966. P. 91.
6. Алиев Т. А., Нусратов О. К. Алгоритмы анализа циклических сигналов // Автоматика и вычислительная техника. 1998. № 2. С. 68–74.
7. Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. P. 755–762.
8. Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013. Vol. 53. P. 11–15.
9. Абдуллаев А. А., Джавадов А. А., Левин А. А., Набиев И. А. Телемеханические комплексы для нефтяной промышленности. М.: Недра, 1982, 200 с.
10. Fasel T. R., Todd M. D. Chaotic insonification for health monitoring of an adhesively bonded composite stiffened panel // Me-

chanical Systems and Signal Processing. 2010. Vol. 24, N. 5. P. 1420–1430.

11. **Hao Tang, Y. H. Liao, J. Y. Cao, Hang Xie.** Fault diagnosis approach based on Volterra models // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. Vol. 24, N. 4. P. 1099–1113.

12. **Aliev T. A.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin. London: Springer, 2007. 223 p.

13. **Bendat Julius S., Piersol A. G.** Random Data, Analysis & Measurement Procedures. Wiley-Interscience, 2000.

14. **Бендат Дж., Пирсол А.** Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир. 1983.312 с.

15. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers, 2003. 213 p.

System for Oil Well SRPU Diagnostics and Control Using the Robust Noise Technology

T. A. Aliev, director@cyber.az, **A. H. Rzayev**, asifrzayev48@gmail.com, **G. A. Guluyev**, scb_06@mail.ru, **T. A. Alizada**, alizadabaku@gmail.com✉, **U. E. Sattarova**, ulker.rzaeva@gmail.com, **N. E. Rzayeva**, nikanell@gmail.com
Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences
9, B. Vahabzadeh St., Baku, AZ 1141 Azerbaijan

Corresponding autor: **Alizada Tahir A.** Ph. D., Head of laboratory, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences, 9, B. Vahabzadeh St., Baku, AZ 1141 Azerbaijan, e-mail: alizadabaku@gmail.com

Received on April 08, 2015

Accepted on May 15, 2015

The authors analysed the noise-induced problems with diagnostics of the sucker rod pumping units (SRPUs) related to the peculiarities of their field operation. The authors demonstrated that the existing diagnostic methods based on interpretation of the dynamometer cards built on the signals received from the force and stroke sensors did not allow to solve the diagnostic and control problems in real time. Therefore they proposed a technology for determination of the robust normalized correlation functions, which were used to form combinations of informative attributes corresponding to the possible emergency states of SRPU. Identification of those states is duplicated by determination and formation of combinations, which correspond to the noise characteristics of the force signal and improve the reliability of the results. When the proposed technology is introduced in the oilfields with a large number of wells, the combinations of the relevant reference coefficients will be determined for each SRPU during their operation, as various kinds of faults occur. Thus, after a certain period of operation, the combinations of the reference coefficients for the corresponding fault types will be formed and saved in the identification units of the SRPU robust control systems at all wells. When the reference coefficients for all the possible SRPU fault types are formed and saved in the identification units, the system will be switched to the automated mode of identification and control. Simplicity of realization of the processing algorithms makes it possible to solve the problem of the force signal identification by means of inexpensive controllers in real-time mode. Application of the technology in more than 100 real objects demonstrated that the profitability of the oil wells increased significantly due to the energy savings and an increase of the overhaul period.

Keywords: noise technology; dynamometer card; sucker rod pumping; oil well; noise variance; cross-correlation function

For citation:

Aliev T. A., Rzayev A. H., Guluyev G. A., Alizada T. A., Sattarova U. E., Rzayeva N. E. System for Oil Well SRPU Diagnostics and Control Using the Robust Noise Technology, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 686–698.

DOI: 10.17587/mau/16.686-698

References

1. **Andreev V. V., Urazakov K. R., Dalimov V. U., Sakhibgaireev R. Sh.** *Spravochnik po dobyche nefi* (Oil extraction handbook), Moscow, Nedra-Biznescentr, 2000, 374 p. (in Russian).

2. **Aliev T. M., Ter-Khachaturov A. A.** *Avtomatičeskij kontrol' i diagnostika SSHNU* (Automated control and diagnostics of SRPU), Moscow, Nedra, 1988, 232 p. (in Russian).

3. **Neely A. B., Tolbert H. E.** Experience with Pump-Off Control in the Permian Basin SPE Paper No. 14345, *SPE Technical Conference and Journal of Petroleum Technology*, May 1988, pp. 645–648.

4. **Nusratov O. K., Guluyev G. A., Rzaev A. G., Pashaev F. G., Jusifov I. B., Rizvanov M. G.** *Informatsionnyi kompleks izmereniya, monitoringa, diagnostiki i upravleniya dlya nefyanykh skvazhin ekspluatiruyushchikhsya shtangovymi, glubinno-nasosnymi ustanovkami* (Information complex measurement, monitoring, diagnostics and control of oil wells operated by rod, downhole pumping SET-kami), *Izvestija NANA, Serija Fiziko-Tehnicheskikh i Matematicheskikh Nauk*, 2009, vol. XXIX, no. 6, pp. 176–183. (in Russian).

5. **Neely A. B., Gibbs S. G.** Computer Diagnosis of Downhole Conditions in SokerRod Pumping Wells, *Journal of Petroleum Technology*, January 1966, p. 91.

6. **Aliev T. A., Nusratov O. K.** *Algoritmy analiza tsiklicheskikh signalov* (Algorithms analysis of cyclic signals), *Avtomatika i Vychislitel'naja Tehnika*, 1998, no. 2, pp. 68–74 (in Russian).

7. **Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B.** Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, pp. 755–762.

8. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, October 2013, vol. 53, pp. 11–15.

9. **Abdullaev A. A., Dzhavadov A. A., Levin A. A., Nabiev I. A.** *Telemehaničeskije kompleksi dlja nefijanoj promyshlennosti* (Telemechanic complexes for oil industry), Moscow, Nedra, 1982, 200 p. (in Russian).

10. **Fasel T. R., Todd M. D.** Chaotic insonification for health monitoring of an adhesively bonded composite stiffened panel, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, vol. 24, no. 5, pp. 1420–1430.

11. **Hao Tang, Liao Y. H., Cao J. Y., Hang Xie.** Fault diagnosis approach based on Volterra models, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, vol. 24, no. 4, pp. 1099–1113.

12. **Aliev T. A.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin, London, Springer, 2007, 223 p.

13. **Bendat J. S., Piersol A. G.** Random Data, Analysis & Measurement Procedures, Wiley-Interscience, 2000.

14. **Bendat Dzh., Pirsol A.** *Primenenie korrelyacionnogo i spektral'nogo analiza* (Application of correlation and spectral analysis), Moscow, Mir, 1983, 312 p. (in Russian).

15. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003, 213 p.

П. А. Ливаткин, аспирант, PAL2010@yandex.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
К. А. Положенцев, аспирант, kirill.polozhentsev@gmail.com,
СТИ НИТУ МИСиС, Московская область, г. Электросталь

Метод оценки скорости переплава расходуемого электрода с использованием лазерного дальномера при управлении вакуумным дуговым переплавом

Предложен метод оценки скорости плавления расходуемого электрода вакуумного дугового переплава, основанный на использовании установленных на смотровые окна печи лазерных дальномеров. Последние позволяют определить объем переплавленного электрода, зная который в предыдущий и текущий моменты времени, и можно определить скорость, с которой идет переплав.

Ключевые слова: вакуумная дуговая печь, объем слитка, объем электрода, скорость переплава, лазерный дальномер, аппроксимация электрода, время замеров, высота слитка, масса слитка, радиус электрода

Скорость переплава является важнейшим технологическим параметром вакуумного дугового переплава (ВДП), отвечающим за кристаллическую структуру слитка, распределение и содержание в ней неметаллических включений.

Изменение скорости переплава позволяет выявить ряд технологических особенностей текущего ВДП, а именно:

1) изменение скорости переплава свидетельствует об увеличении длины электрической дуги, уменьшении межэлектродного промежутка и увеличении тока утечки с возникновением боковых "паразитных" дуг на стенке кристаллизатора, которые могут прожечь его и вывести из строя установку;

2) уменьшение скорости переплава говорит об увеличении напряжения печи, росте межэлектродного промежутка и увеличении тепловых потерь;

3) возможное изменение скорости переплава при понижении напряжения печи способствует возникновению кратковременных коротких капельных замыканий, из-за чего снижается мощность электрической дуги.

Поэтому оценка скорости переплава расходуемого электрода очень важна. С ее помощью определяются важные технологические величины: межэлектродный промежуток и изменение длины электрической дуги.

Вакуумный дуговой переплав

Поддержание желаемой скорости переплава расходуемого электрода (СПРЭ) позволяет получать равномерную скорость наплавления слитка вакуумного дугового переплава, что, в свою очередь, повышает физические свойства и структуру получаемого металла.

Схема вакуумной дуговой печи приведена на рис. 1.

Вакуумная дуговая (ВД) печь — электрическая печь для переплавления металлов в вакууме энергией электрической дуги. Вместе с тем ВД печь — газоразрядная система, где электрическая дуга существует на поверхностях переплавляемого металла и

получаемого слитка (3). Переплавляемый электрической дугой металл называют электродом (5). Он крепится к подвижному механическому штоку 2. Для вертикального перемещения штока с зажатым электродом печь имеет электродвигатель постоянного тока (ДПТ) 1. При подаче постоянного тока между электродом (катод) и кристаллизатором (анод) возникает электрическая дуга. Выделяющаяся теплота расплавляет электрод, жидкий металл стекает в кристаллизатор 4, образуя слиток.

Автоматическое управление ВД печью представляет сложную систему, которая зависит от ряда параметров, таких как скорость переплава, масса слитка, межэлектродное расстояние и т. д.

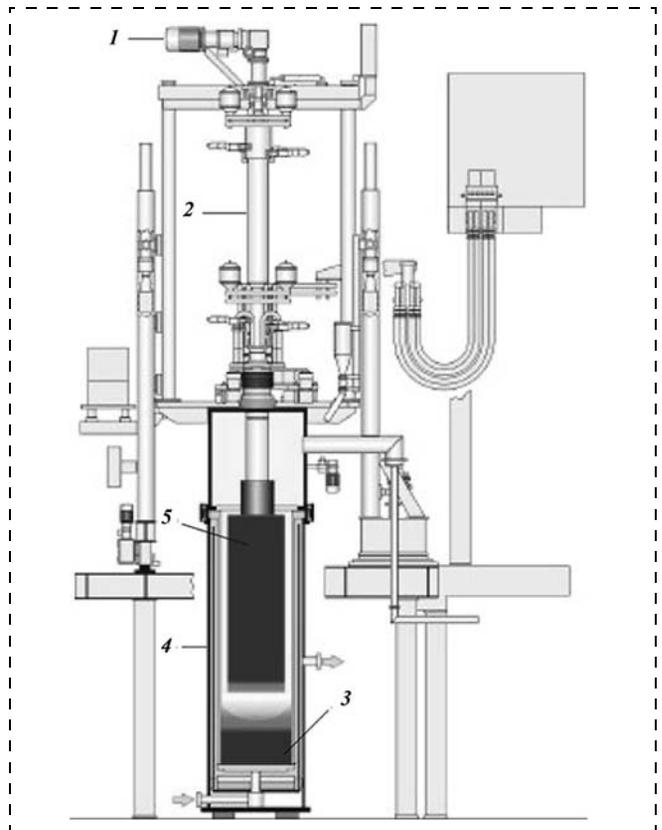


Рис. 1. Схема ВД печи

Процесс управления вакуумным дуговым переплавом строится за счет поддержания заданного межэлектродного промежутка и желаемой скорости плавления расходоуемого электрода.

На сегодняшний момент известны два способа "прямого" измерения СПРЭ: по измерению массы расходоуемого электрода и наплавляемого слитка и по частоте капельных импульсов.

В рассмотренных работах [7, 9] скорость переплава находится с помощью установленных на печи массовых датчиков. Большое число иностранных и российских фирм используют способы определения СПРЭ, приведенные в работах [7, 9]. На этом принципе построено определение скорости плавления расходоуемого электрода у германской фирмы ALD и американской Consarc.

На ВД печах фирмы ALD массовый датчик устанавливают на шток с расходоуемым электродом для определения текущей скорости переплава, которую находят из следующего выражения:

$$v_{\text{п}}^{\text{ALD}}(t) = \frac{w_{\text{сг}}}{\Delta t},$$

где Δt — время, в течение которого измеряют скорость переплава; $w_{\text{сг}}$ — масса сгоревшего за время Δt остатка.

Американская фирма Consarc использует четыре опоры для поддержания электрода. В эти четыре опоры устанавливаются массовые датчики для измерения массы расходоуемого электрода.

Масса электрода находится по формуле

$$w(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i(t)}{4},$$

где $w(t)$ — суммарная масса электрода; $w_i(t)$ — масса электрода, которая получена каждым массовым датчиком.

Скорость переплава электрода

$$v_{\text{п}}^{\text{Cons}}(t) = \frac{\Delta w}{\tau},$$

где $v_{\text{п}}^{\text{Cons}}(t)$ — скорость переплава электрода; Δw — изменение текущей массы электрода; τ — промежуток времени.

Определение скорости переплава по частоте капельных импульсов [10] основывается на определении условной массы капли жидкого металла, стекающего с электрода, как отношения массы сплавленной части электрода за достаточно большой период времени к общему числу капельных импульсов напряжения печи, прошедших за это время.

Учитывая ошибки при измерении массы расходоуемого электрода и трудности выделения капельных импульсов от коротких замыканий, целесообразно использовать эти два способа одновременно.

Метод лазерной велосометрии оценки СПРЭ

Как найти скорость переплава, если установить массовые датчики нельзя из-за конструктивных особенностей ВД печи, а частота капельных импульсов сильно зашумлена?

В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается ВД печь типа ДВС-320-Г1, разработанная в СССР [2–4]. Установка массовых датчиков не представляет возможным определить объем наплавленного слитка и текущий объем электрода. Это связано с конструктивными особенностями печи:

1) установка массового датчика на штоке не позволяет измерять с достаточной точностью ввиду трения между штоком и уплотнительными кольцами (± 100 кг);

2) установка массового датчика под кристаллизатор невозможна в связи с трением между штоком и уплотнительными кольцами, а также из-за изменяющегося протока воды в охлаждающих контурах кристаллизатора [5, 6];

3) установка массового датчика внутри кристаллизатора (под слитком) невозможна из-за высоких температур и необходимости поддержания вакуума [6, 7].

Частоту капельных импульсов трудно определить из-за высокой стоимости датчиков капельных импульсов.

Решением данной проблемы является метод оценки СПРЭ. Метод основан на установке на смотровые окна ВД печи двух лазерных дальномеров (ЛД), измеряющих расстояние сначала до дна кристаллизатора, а затем до верхней части наплавляемого слитка. Сигнал с ЛД поступает на блок сбора и обработки сигналов, а затем в контроллер ВД печи. Снимая показания с двух ЛД и находя среднее значение расстояния, определяем текущее положение наплавляемого слитка с точностью до 1 мм:

$$l_{\text{д.с}}(t) = \frac{l_{\text{д1}}(t) + l_{\text{д2}}(t)}{2},$$

где $l_{\text{д.с}}$ — среднее значение длины до слитка; $l_{\text{д1}}$, $l_{\text{д2}}$ — значение длины с первого и второго дальномеров до слитка соответственно.

Схема ВД печи с ЛД приведена на рис. 2.

Вакуумная камера состоит из верхней части 1 и нижней части (кристаллизатора) 2. Во время наведения "жидкой" ванны происходит начало наплавления слитка 3. При переплаве расходоуемого электрода 4 увеличивается уровень наплавляемого слитка. Путем перемещения штока 5 с расходоуемым электродом осуществляется регулирование межэлектродного расстояния. С помощью лазерных дальномеров 6 определяются расстояния сначала до дна кристаллизатора, а затем до слитка, которые передаются обработчику сигнала с дальномеров.

Среднее значение расстояния до дна кристаллизатора в начальный момент времени находится из следующего выражения:

$$l_{\text{д.с}}(0) = \frac{l_{\text{д1}}(0) + l_{\text{д2}}(0)}{2}.$$

Усредненное значение длины в момент времени t

$$l_{\text{д.уср}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t l_{\text{д.с}}(t) dt,$$

где $l_{\text{д.уср}}$ — усредненное значение длины; t — текущее время; T — время усреднения значений.

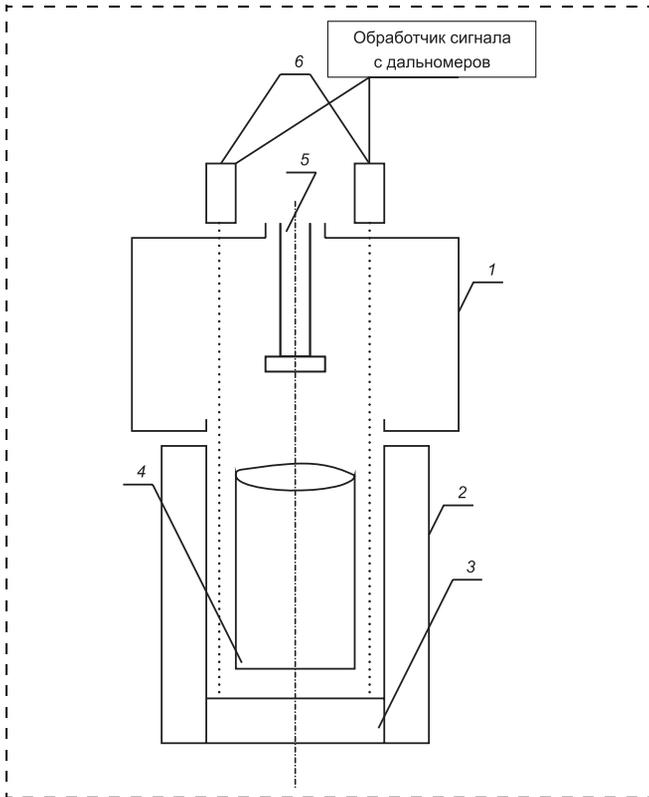


Рис. 2. Схема ВД печи с ЛД

Чтобы найти высоту образующейся слитка, воспользуемся следующей формулой:

$$h_{\text{сл}}(t) = h_{\text{кр}} - l_{\text{д.уср}}(t),$$

где $h_{\text{сл}}(t)$ — высота образующейся слитка; $h_{\text{кр}}$ — длина до дна кристаллизатора.

Текущий объем слитка будет равен [2, 8, 9]

$$V_{\text{сл}}(t) = \pi R^2 h_{\text{сл}}(t),$$

где $V_{\text{сл}}(t)$ — текущий объем слитка; R — радиус кристаллизатора.

Для определения участка аппроксимации электрода по программному управлению будем последовательно вычитать из объема наплавляемого слитка объемы участков аппроксимируемого электрода до тех пор, пока оставшийся объем слитка не окажется меньше объема участка аппроксимируемого электрода, и после этого найдем текущий радиус электрода:

$$\sum_{i=1}^n \pi r_i^2 l_{\text{э}i} < V_{\text{сл}} < \sum_{i=1}^{n+1} \pi r_i^2 l_{\text{э}i}, \quad (1)$$

где r_i — радиус электрода на i -м ($i = \overline{1, n}$) интервале аппроксимации; $l_{\text{э}i}$ — длина электрода на i -м ($i = \overline{1, n}$) интервале аппроксимации.

Из неравенства (1) найдем текущее значение радиуса электрода $r_{\text{э}}(t)$:

$$r_{\text{э}}(t) = r_n.$$

Зная объем слитка, можно определить текущую массу слитка [2, 10, 11]:

$$m_{\text{сл}}(t) = V_{\text{сл}}(t)\rho,$$

где $m_{\text{сл}}(t)$ — масса слитка; ρ — плотность слитка.

Текущая масса электрода равна

$$m_{\text{эл}}(t) = m_{\text{эл}}(0) - m_{\text{сл}}(t),$$

где $m_{\text{эл}}(0)$ — начальная масса электрода.

Определив массу в текущий и предыдущий моменты времени, получаем скорость переплава электрода:

$$v_{\text{пер}}(t) = \frac{V_{\text{эл}}(t + \Delta t) - V_{\text{эл}}(t)}{\Delta t},$$

где $v_{\text{пер}}(t)$ — скорость переплава; $V_{\text{эл}}(t)$ — объем расходуемого электрода; Δt — приращение времени.

Исходя из полученных значений массы расходуемого электрода и скорости переплава электрода, корректируем скорость переплава расходуемого электрода, изменяя мощность ВД печи [12, 13].

Ошибка скорости переплава определяется выражением

$$\varepsilon_v(t) = \frac{|v_{\text{п.ж}}(t) - v_{\text{п}}(t)|}{v_{\text{п.ж}}(t)}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_v(t)$ — ошибка скорости переплава (%), $v_{\text{п.ж}}(t)$ — желаемая скорость переплава (задается технологами).

Вместе с тем, скорость переплава определяется следующим образом [14]:

$$v_{\text{пер}}(t) = \frac{m_{\text{эл}}(t)}{t_{\text{пл}}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{пл}}$ — время между замерами.

Запишем выражение (2) в следующем виде, используя (3):

$$\varepsilon_m(t) = \frac{|m_{\text{эл.ж}}(t) - m_{\text{эл}}(t)|}{m_{\text{эл.ж}}(t)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_m(t)$ — ошибка массы электрода; $m_{\text{эл.ж}}(t)$ — желаемая масса электрода (задается технологами).

Тогда

$$m_{\text{э}}(t) = m_{\text{эл.ж}}(t) - m_{\text{эл}}(t) —$$

погрешность между желаемым и текущим значениями массы электрода.

Тогда выражение (4) можно представить в виде

$$\varepsilon_m(t)m_{\text{эл.ж}}(t) = |m_{\text{э}}(t)|. \quad (5)$$

Погрешность масс можно записать следующим образом:

$$m_{\text{э}}(t) = \rho V_{\text{э}}(t), \quad (6)$$

где $V_{\text{э}}(t)$ — погрешность объема, которая может быть найдена по формуле [15, 16]

$$V_{\text{э}}(t) = \pi R^2 h_{\text{э}}(t), \quad (7)$$

где $h_{\text{э}}(t)$ — погрешность высоты слитка, которая определяется с помощью дальномеров и принимается как максимальная погрешность с дальномеров, равная 0,002 м.

В выражение (5) подставим (3), (6) и (7):

$$\varepsilon_m(t)v_{\text{п.ж}}(t)t_{\text{пл}} = |\rho\pi R^2 h_{\text{э}}(t)|. \quad (8)$$

Выразим $t_{пл}$ из (8):

$$t_{пл} = \frac{\rho \pi R^2 |h_{\varepsilon}(t)|}{\varepsilon_m(t) v_{п.ж}(t)}$$

Время между замерами для всех сплавов, переплавляемых ВД печью ДВС-320-Г1 на АО "Металлургический завод "Электросталь", составляет 4 мин. За рассчитанное время скорость переплава изменяется незначительно, так что разработанная система позволяет поддерживать скорость переплава на желаемом уровне.

Экспериментальная апробация метода оценки СПРЭ

Промышленная применимость метода оценки СПРЭ подтверждается следующими экспериментами.

Эксперимент № 1. Осуществляли выплавку слитка из сплава ПШРЗ ЭП718 диаметром 320 мм и массой 670 кг в вакуумной дуговой печи ДВС-320-Г1. Расходуемый электрод диаметром 250 мм помещали на поддон кристаллизатора диаметром 320 мм. После вакуумирования возбуждали электрическую дугу между поддоном кристаллизатора и нижним торцом электрода, устанавливали дуговой зазор 20 мм. Расстояние от смотрового окна до поддона кристаллизатора составляло 3800 мм. Далее в течение 5 мин проводили прогрев расходуемого электрода при токе 2,5 кА. Затем в течение 6 мин происходило повышение тока до 5 кА и наведение "жидкой" ванны. При наведении "жидкой" ванны расстояние от смотрового окна до поверхности образующегося наплавляемого слитка изменялось и становилось равным 3795 мм. При этом теоретическое значение массы электрода падало с 677 до 670 кг. Далее выходили на рабочий режим переплава при токе 3,8 кА. Через полчаса плавания на основном режиме останавливали переплав, остужали, вынимали и взвешивали электрод. Масса электрода составила 598 кг, а расстояние до образующегося слитка было равно 3696 мм. Следовательно, слиток увеличился на 101 мм. Таким образом, получаем, что скорость переплава составляет примерно 2,2 кг/мин. Начинали плавить оставшуюся часть электрода и через час плавания снова останавливали печь, вынимали электрод, взвешивали его и получали массу электрода, равную 465 кг, при этом слиток увеличился на 198 мм. Зная, на сколько уменьшилась масса расходуемого электрода, найдем скорость переплава, равную 2,2 кг/мин. Провели измерение высоты слитка через 3 ч: слиток увеличился на 597 мм, а расстояние до образующегося слитка стало равным 2968 мм. Снова подсчитали скорость и получили 2,2 кг/мин. Отсюда получается, что переплав расходуемого электрода, а следовательно, и скорость натекания наплавляемого слитка идут с равной скоростью в течение всего переплава.

Эксперимент № 2. Осуществляли выплавку слитка из сплава 08X18N10 диаметром 320 мм и массой 935 кг в вакуумной дуговой печи ДВС-320-Г1. Расходуемый электрод диаметром 250 мм помещали на поддон кристаллизатора диаметром 320 мм. После

вакуумирования возбуждали электрическую дугу между поддоном кристаллизатора и нижним торцом электрода, устанавливали дуговой зазор 20 мм. Расстояние от смотрового окна до поддона кристаллизатора составляло 3800 мм. Далее в течение 5 мин проводили прогрев расходуемого электрода при токе 2,5 кА. Затем в течение 6 мин происходило повышение тока до 7,5 кА и наведение "жидкой" ванны. При наведении "жидкой" ванны расстояние от смотрового окна до поверхности образующегося наплавляемого слитка изменялось и становилось равным 3730 мм. При этом теоретическое значение массы электрода падало с 935 до 931 кг. Далее выходили на рабочий режим переплава при токе 5,5 кА. Через полчаса плавания на основном режиме снимали значение массы электрода, которое составляло 798 кг. Измеряя расстояние до образующегося слитка, получали значение длины 3520 мм. Следовательно, слиток увеличился на 210 мм. Таким образом, получаем, что скорость переплава составляет примерно 4,45 кг/мин. Через час плавания расходуемого электрода слиток увеличился на 420 мм, а масса расходуемого электрода уменьшилась до 534 кг. Зная, на сколько уменьшилась масса расходуемого электрода, найдем скорость переплава, которая составит 4,5 кг/мин. Провели измерение высоты слитка через 2 ч. Слиток увеличился на 846 мм, а расстояние от смотрового окна до образующегося слитка стало равным 2254 мм. Таким образом, скорость стала 4,5 кг/мин. Отсюда получается, что переплав расходуемого электрода, а следовательно, и скорость натекания наплавляемого слитка идут с равной скоростью в течение всего переплава.

Эксперимент № 3. Для дополнительной апробации работы метода оценки СПРЭ система с датчиками была установлена на вакуумную дуговую печь ALD на АО "Металлургический завод "Электросталь". Поскольку на печи ALD установлена система по определению скорости переплава с использованием массового датчика, сравним полученные данные с методом оценки СПРЭ, приведенным в данной работе. Была проведена выплавка слитка сплава 08X18N10 диаметром 320 мм. Данные снимали через 1 ч после выхода печи на рабочие значения в установившемся режиме работы.

График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью массовых датчиков, приведен на рис. 3.

Полученная скорость переплава (рис. 3) составляет около 4,32 кг/мин, что на 0,18 кг/мин меньше желаемой скорости переплава для данного сплава.

График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью метода оценки СПРЭ, приведен на рис. 4.

Полученная скорость переплава (рис. 4) составляет около 4,32 кг/мин, что на 0,18 кг/мин меньше желаемой скорости переплава для данного сплава.

Скорость переплава, полученная с помощью метода оценки СПРЭ, совпадает со скоростью переплава, полученной с помощью массового датчика.

Благодаря разработанному методу оценки СПРЭ (метод лазерной велосометрии) решается актуаль-

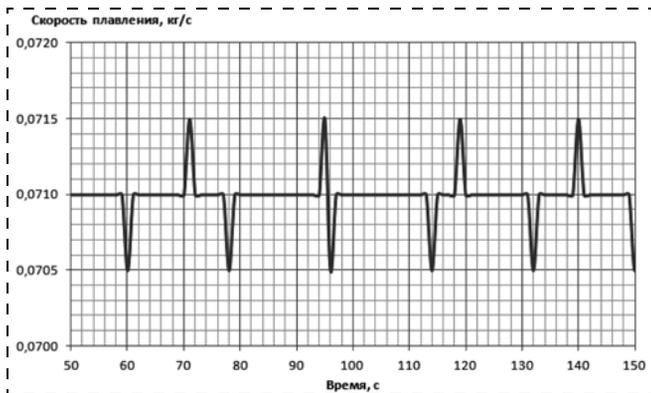


Рис. 3. График скорости переплава, снятый с печи ALD с помощью весовых датчиков

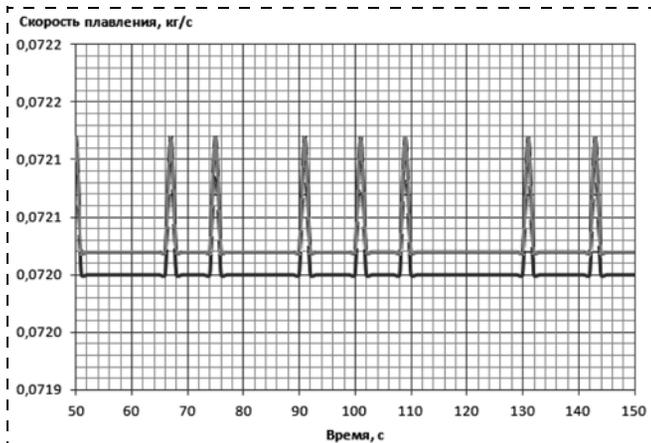


Рис. 4. График скорость переплава, снятый с печи ALD с помощью метода оценки СПРЭ (показания с двух ЛД)

ная задача поддержания желаемой скорости плавления расходоуемого электрода при вакуумном дуговом переплаве на старых типах печей, которые из-за своих конструктивных особенностей не позволяют использовать весовые датчики или способ определения по частоте коротких замыканий. Метод оценки СПРЭ позволяет, не закупая новых ВД печей, проводить переплав современного сортамента сталей высокого качества с низким процентом брака, что очень актуально ввиду сложившейся экономической обстановки в стране.

Список литературы

1. Положенцев К. А., Ливаткин П. А., Александров А. Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 1 // Известия вузов: Черная металлургия. 2015. № 3. С. 203–206.
2. Лапшин И. В. Автоматизация дуговых печей. М.: Издательство МГУ, 2004. 165 с.
3. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.
4. Ташкинов А. Ю. Разработка математических моделей и алгоритмов и их применение для исследования и усовершенствования процессов вакуумного дугового переплава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2003. 21 с.
5. Нехамин И. С. Разработка системы управления дуговой пчью постоянного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 20 с.
6. Фомин А. В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Изв. тульского госуд. университета. Техн. науки. 2009. № 3. С. 315–321.
7. Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. Vacuum Arc — A Cathodic Arc Operating Without Any Process Gas. Springer US. 2013. P. 3945.
8. Kovaleva M. G., Kolpakov A. J., Poplavsky A. I., Galkina M. E. Effect of vacuum annealing on tribological behavior of nanosized diamond-like carbon coatings produced by pulse vacuum-arc method // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34, Iss. 6. P. 481–486.
9. Woodside C. R., King P. E., Nordlund C. Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44, Iss. 1. P. 154–165.
10. Zhi-jun Yang 杨治军, Hong-chao Kou 寇宏超, Xiao-hua Zhao 赵小华, Jin-shan Li 李金山, Rui Hu 胡锐, Hui Chang 常辉, Lian Zhou 周廉. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2011. Vol. 16, Iss. 2. P. 133–136. §
11. Shmelev D. L., Barenholtz S. A., Shchitov N. N. The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma. Technical Physics Letters. 2014. Vol. 40, Iss. 9. P. 783–786.
12. Belyanchikov L. N. Stabilization of vacuum arc remelting of steels and alloys // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012, Iss. 12. P. 1017–1021.
13. Blinkov I. V., Volkhonskii O. A., Anikin V. N., Konukhov Yu. V. Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2012. Vol. 48, Iss. 6. P. 649–655.
14. Savostikov V. M., Potekaev A. I., Tabachenko A. N. Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition // Russian Physics Journal. 2011. Vol. 54, Iss. 7. P. 756–764.
15. Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Struts V. K. Mechanisms and behavioral regularities of the vacuum-arc microparticles near and on a potential electrode immersed in plasma. Journal of Surface Investigation // X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. Vol. 7, Iss. 6. P. 1148–1155.
16. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., Stolbovoi V. A. Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Vol. 54, Iss. 3–4. P. 195–203.

Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting

P. A. Livatkin, PAL2010@yandex.ru,

Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, 117997, Russian Federation,

K. A. Polozhentsev, kirill.polozhentsev@gmail.com✉,

Sary Oskol Technological Institute (branch of National Research Technological University "MISIS"),
Sary Oskol, 309516, Russian Federation

Corresponding author: Polozhentsev Kirill A., Postgraduate, Sary Oskol Technological Institute A. A. Ugarov
(branch of National Research Technological University "MISIS"),
Sary Oskol, 309516, Russian Federation, e-mail: kirill.polozhentsev@gmail.com

Received on May 02, 2015

Accepted on June 05, 2015

The paper suggests ways to determine the technological parameters of vacuum arc remelting. Usually, the remelting automated control systems measure only the quantities necessary for a direct control, which in certain cases cannot be used to estimate the reliably the technological parameters of melting. Maintaining of certain technological parameters during melting is a prerequisite for obtaining a quality ingot. These parameters include the melting rate. It cannot be measured directly and it is expected that, with certain values of the electrical power given to the furnace, it will be maintained within the technology described limits, which is not always a fact. The subject of this paper is the method for determination of the rate of melting of a consumable electrode, when, due to the design features of the vacuum arc furnace, it is not possible to measure the weight of the consumable electrode and the ingot. This problem can be solved by installation on the viewing window of the furnace of laser range finders, which in their turn help to determine the amount of the remelted electrode. Knowing the volume of the consumable electrode in the previous and current periods of time one can determine the rate of the going on remelting. Determination of the speed of measurement of the laser range finders is not the least task. The relevance of the data is very important. If measurements are done every four minutes, the system allows us to maintain the rate of melting at the desired level. Since the system of maintaining of the supply of electrical power to the furnace is reasonably stable and rapid heating of the electrode without increasing the power is not feasible, we can expect a stable speed of remelting without any significant deviations from the estimated value.

Keywords: vacuum arc furnace, volume of ingot, volume of electrode, rate of melting, laser rangefinder, electrode approximation, time of measurements, height of ingot, weight of ingot, radius of the electrode

For citation:

Livatkin P. A., Polozhentsev K. A. Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 699–704.

DOI: 10.17587/mau.16.699-704

References

1. **Polozhentsev K. A., Livatkin P. A., Aleksandrov A. G.** *Postroenie modeli protsessa upravleniya napryazheniem vakuumnoi dugovoi pechi. Soobshchenie 1* (Building a model of the process control voltage vacuum arc furnace. Message 1) *Izvestiya Vuzov: Chernaya Metallurgiya*, 2015, no. 3, pp. 203–206 (in Russian).
2. **Lapshin I. V.** *Avtomatizatsiya dugovykh pechei* (Automatisation arc oven), Moscow, Publishing house of NSU, 2004, 165 p. (in Russian).
3. **Mikhailov O. P.** *Avtomatizirovannyyi elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov* (Automated electric drive machines and industrial robots), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 304 p. (in Russian).
4. **Tashkinov A. Yu.** *Razrabotka matematicheskikh modelei i algoritmov i ikh primeneniye dlya issledovaniya i usovershenstvovaniya protsessov vakuumnogo dugovogo pereplava* (Development of mathematical models and algorithms and their application to the study and improvement of the processes of vacuum arc remelting): Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk, Ekaterinburg, 2003, 21 p. (in Russian).
5. **Nekhamin I. S.** *Razrabotka sistemy upravleniya dugovoi pech'yu postoyannogo toka* (Development of control system of arc furnace DC): Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2009, 20 p. (in Russian).
6. **Fomin A. V.** *Postroenie imitatsionnoi modeli dugovoi staleplavil'noi pechi* (Building a simulation model of the electric arc furnace), *Izv. Tul'skogo Gosud. Universiteta. Tekhn. Nauki*, 2009, no. 3, pp. 315–321. (in Russian).
7. **Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung.** Vacuum Arc — A Cathodic Arc Operating Without Any Process Gas. Springer US. 2013. P. 3945.
8. **Kovaleva M. G., Kolpakov A. J., Poplavsky A. I., Galkina M. E.** Effect of vacuum annealing on tribological behavior of nanosized dia-

mond-like carbon coatings produced by pulse vacuum-arc method, *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, iss. 6, pp. 481–486.

9. **Woodside C. R., King P. E., Nordlund C.** Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, vol. 44, iss. 1, pp. 154–165.

10. **Zhi-jun Yang** 杨治军, **Hong-chao Kou** 寇宏超, **Xiao-hua Zhao** 赵小华, **Jin-shan Li** 李金山, **Rui Hu** 胡锐, **Hui Chang** 常辉, **Lian Zhou** 周廉. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2011, vol. 16, iss. 2, p. 133–136.

11. **Shmelev D. L., Barendolts S. A., Shchitov N. N.** The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma, *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, iss. 9, pp. 783–786.

12. **Belyanchikov L. N.** Stabilization of vacuum arc remelting of steels and alloys, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, iss. 12, pp. 1017–1021.

13. **Blinkov I. V., Volkonskii O. A., Anikin V. N., Konukhov Yu. V.** Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2012, vol. 48, iss. 6, pp. 649–655.

14. **Savostikov V. M., Potekaev A. I., Tabachenko A. N.** Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition, *Russian Physics Journal*, 2011, vol. 54, iss. 7, pp. 756–764.

15. **Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Struts V. K.** Mechanisms and behavioral regularities of the vacuum-arc microparticles near and on a potential electrode immersed in plasma. *Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, vol. 7, iss. 6, pp. 1148–1155.

16. **Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., Stolbovoi V. A.** Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings, *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, iss. 3–4, pp. 195–203.

УДК 66-5

DOI: 10.17587/mau.16.704-709

Ю. В. Загашвили, д-р техн. наук, проф., ген. директор, y.zagashvili@yandex.ru,
Ю. В. Анискевич, канд. техн. наук, науч. сотр., **А. М. Кузьмин**, канд. техн. наук, науч. сотр.,
А. А. Левихин, канд. техн. наук, науч. сотр., **Г. Б. Савченко**, науч. сотр.,
 ООО "БТП", Санкт-Петербург

Управление технологическим процессом получения синтез-газа в высокотемпературном реакторе

Предложен метод получения синтез-газа заданного состава при реализации перспективной технологии парциального окисления углеводородного горючего. Желаемое соотношение компонентов синтез-газа и требуемая производительность высокотемпературного реактора по синтез-газу обеспечиваются путем связанного регулирования компонентов подачи — массовых расходов углеводородного горючего и окислителя. Метод управления иллюстрируется примером расчета процесса парциального окисления попутного нефтяного газа кислородом.

Ключевые слова: парциальное окисление, углеводородное горючее, окислитель, синтез-газ, высокотемпературный реактор, водород, монооксид углерода, термодинамические расчеты, соотношение компонентов, коэффициент избытка окислителя, химический состав горючего, производительность реактора

Введение

Синтез-газ, представляющий собой смесь водорода и монооксида углерода, используется в качестве сырья для химической промышленности или как промежуточный продукт в технологиях переработки природных и попутных газов нефтяных месторождений в моторные топлива [1—5].

Проблемам совершенствования традиционных и созданию новых технологий получения синтез-газа посвящены многочисленные исследования и разработки. В основе традиционных технологий лежат базовые процессы получения синтез-газа (паровая и автотермическая конверсия). В этом направлении работают фирмы Exxon, BG Technology, British Petroleum (BP), ICI Katalco. Работы по созданию новых технологий производства синтез-газа проводят Air Products and Chemical Inc., Babcock & Wilcox Co., Atlantic Richfield Co (ARCO) и др.

Одной из наиболее перспективных технологий является парциальное окисление углеводородного сырья кислородом или кислородом воздуха в малогабаритных высокоэнергоемких высокотемпературных химических реакторах (ВТР), в которых при варьировании режимных параметров можно получать синтез-газ различного состава и количества [6—11].

Принципиально получение синтез-газа возможно практически из любого углеводородного сырья, но наиболее актуально и экономически целесообразно использование углеводородных газов (УВГ) — метана, природного и попутного газа нефтяных месторождений (ПНГ).

Важнейшим химическим соединением, входящим в состав УВГ и определяющим в конечном итоге балансовые соотношения продуктов парциального окисления УВГ, является метан. Объемная доля метана, имеющего наибольшее водородное число среди входящих в состав УВГ химических соединений, может варьироваться в широких пределах от 40 до 95 % в зависимости от типа используемого УВГ. Поэтому и соотношение объемных долей компонентов синтез-газа (водорода H_2 и монооксида углерода CO) и массовое содержание синтез-газа по отношению к балластным газам (водяному пару, диоксиду углерода, оксиду азота) в продуктах парциального окисления УВГ может значительно изменяться.

Традиционный способ управления технологическим процессом получения синтез-газа заданного состава состоит в стабилизации параметров номинального режима парциального окисления. При этом расчетные значения массовых расходов горючего и окислителя, обеспечивающие требуемую производительность реактора по синтез-газу и желаемое соотношение его компонентов, поддерживаются постоянными с помощью расходомеров-регуляторов подачи компонентов [6, 11].

Недостатком традиционного способа является невозможность учета изменения энтальпии горючего, особенно в случае использования ПНГ с изменяющимися концентрациями входящих в его состав химических соединений, главным образом метана.

Поскольку для каждой конкретной технологии органического синтеза требования, предъявляемые к соотношению водорода и монооксида углерода в получаемом синтез-газе, различны (например, в процессе Фишера—Тропша при получении синтетического бензина желаемое соотношение объемных долей синтез-газа $C^{H_2}/C^{CO} = 2$ [4]), то актуальной проблемой является обеспечение требуемого состава синтез-газа с учетом ряда дополнительных технологических ограничений.

Постановка задачи

Входными управляющими воздействиями на ВТР являются массовые расходы подачи компонентов. Давление подачи и температура подогрева компонентов оказывают незначительное влияние на состав синтез-газа в окрестности номинальных значений соотношения компонентов [6, 11].

Не умаляя общности, будем рассматривать в дальнейшем ПНГ в качестве УВГ, а кислород — в качестве окислителя. Обозначим массовый расход ПНГ $m^{ПНГ}$, массовый расход кислорода m^K .

Одним из основных параметров, характеризующих технологический режим парциального окисления УВГ, является коэффициент избытка окислителя, рассчитываемый по формуле

$$\alpha = m^K / (m^{ПНГ} K_{m0}), \quad (1)$$

где $K_{m0} = 2,9...4,2$ — стехиометрическое значение соотношения компонентов для пары кислород—ПНГ, изменяющееся в зависимости от концентрации метана в ПНГ.

Целью управления является оптимизация основного технологического режима работы ВТР — режима получения синтез-газа заданного состава и с заданной производительностью в условиях изменяющихся характеристик ПНГ при наличии технологических ограничений.

Основным технологическим ограничением является необходимость нахождения параметра α в заданном диапазоне. Как правило,

$$\alpha = \bar{\alpha} \mp 10 \%, \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}$ — значение коэффициента избытка окислителя в номинальном режиме, которое выбирается по данным предварительных термодинамических расчетов для конкретной пары горючее—окислитель исходя из условий обеспечения заданного состава синтез-газа, предотвращения сажеобразования, ограничения температуры газа на выходе реактора и других факторов [6, 11].

Метод управления

Описание исходных данных. Пусть известен химический состав ПНГ и диапазон изменения объемных долей составляющих его химических соединений, главным образом метана. В существующих установках получения синтез-газа компоненты, поступающие в реактор, часто увлажняются для снижения образования сажи при парциальном окислении УВГ. Доля паров воды, поступающая с ос-

новными компонентами в ВТР, может составлять до 20 % по массе от расхода УВГ в зависимости от технологической схемы и конструктивных особенностей установки. Пример физико-химического состава ПНГ (мольное содержание компонентов в процентах) приведен ниже:

Метан	75,53
Этан	13,71
Пропан	3,92
и-Бутан	0,50
н-Бутан	1,16
и-Пентан	0,26
н-Пентан	0,25
Алканы C ₆₊	0,16
Циклоалканы	0,11
Арены	0,01
Азот	3,89
Кислород	0,00
Водород	0,09
Гелий	0,17
Углекислый газ	0,00
Вода	0,24

Стехиометрические соотношения компонентов для пары кислород—ПНГ представлены в таблице.

На основании имеющихся данных проводится предварительный термодинамический расчет концентраций компонентов и других характеристик синтез-газа на выходе камеры сгорания ВТР при различных сочетаниях параметров режима парциального окисления ПНГ — коэффициента избытка окислителя, давления в камере сгорания, объемной доли метана в ПНГ, степени увлажнения ПНГ, температуры подогрева компонентов подачи. Результаты расчетов служат исходными данными для проектирования реактора, они же используются при обосновании номинального технологического режима парциального окисления УВГ и в предлагаемом алгоритме управления процессом.

В качестве примера на рис. 1—3 (см. третью сторону обложки) приведены фрагменты термодинамических расчетов, проведенных с учетом вариаций состава ПНГ для исходных данных (см. выше) на основе алгоритмов и методик, изложенных в справочнике [12]. На рис. 1—3 (см. третью сторону обложки) показано влияние изменения состава ПНГ на выход основных составляющих синтез-газа при нагреве компонентов подачи до 500 К, добавке воды в количестве 20 % от массового расхода ПНГ и давления в камере сгорания 5,0 МПа.

Описание алгоритма управления. Предполагается, что завершены переходные процессы, связанные с выводом реактора на номинальный расчетный режим, характеризуемый заданным химическим со-

ставом ПНГ, рабочим давлением и температурой подачи компонентов. Также с помощью расходомеров-регуляторов обеспечены расчетные номинальные значения массовых расходов подачи компонентов $m^{\text{ПНГ}}$ и m^{K} , их номинальное соотношение $\bar{\alpha}$ и номинальная расчетная производительность реактора по синтез-газу M .

Тогда алгоритм управления процессом следующий.

Шаг 1. Определение текущей объемной доли метана в ПНГ в линии подачи горючего $C^{\text{ПНГ}}(n)$, где n — произвольный номер такта опроса газоанализатора.

Изменение состава ПНГ происходит сравнительно редко, поэтому длительность интервала опроса составляет не менее 10 мин.

Шаг 2. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов значения стехиометрического соотношения компонентов $K_{m0}(n)$.

Для пары кислород—ПНГ справочные данные приведены в таблице.

Шаг 3. Определение по данным термодинамических расчетов при $\alpha(q-1)$, $C^{\text{ПНГ}}(n)$ отношения объемных долей компонентов синтез-газа ($C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}}$) на шаге q внутреннего цикла управления, где $q=1,2,\dots$ — целое положительное число, характеризующее число внутренних итераций алгоритма до выполнения условия (3). При $q=1$ имеем $\alpha(0) = \alpha(n-1)$.

Для пары кислород—ПНГ эти отношения могут определяться по графикам, приведенным на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Длительность одного цикла расчета в зависимости от производительности и геометрии реактора, а также рабочего давления должна находиться в диапазоне 0,2...0,5 с.

Шаг 4. Определение $\Delta(q) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(q) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_n$, где $(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_n$ — отношение объемных долей компонентов синтез-газа в номинальном режиме.

Шаг 5. Проверка условия

$$|\Delta(q)| < \Delta_n, \quad (3)$$

где Δ_n — заданное в технических условиях значение.

Если условие (3) выполняется при $q=1$, то управление на текущем такте n остается неизменным и, соответственно, массовые расходы компонентов подачи не корректируются до следующего анализа состава ПНГ, при этом $m^{\text{ПНГ}}(n) = m^{\text{ПНГ}}(n-1)$, $m^{\text{K}}(n) = m^{\text{K}}(n-1)$, $\alpha(n) = \alpha(n-1)$.

Если условие (3) выполняется при $q \geq 2$, то переходят к шагу 9 алгоритма.

Если условие (3) не выполняется, то переходят к следующему шагу алгоритма.

Шаг 6. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов приращения $\Delta\alpha(q)$, обеспечивающего желаемое соотношение объемных долей компонентов синтез-газа при текущем значении $C^{\text{ПНГ}}(n)$.

Для пары ПНГ—кислород это приращение можно определить по соответствующему графику на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Стехиометрические соотношения ПНГ и кислорода

Показатели	Значения				
	55	65	75	85	95
Концентрация метана, об. %	55	65	75	85	95
Массовое стехиометрическое соотношение компонентов без добавки воды	3,65	3,74	3,85	3,96	4,11
Массовое стехиометрическое соотношение компонентов с добавкой 20 % воды к массе ПНГ	2,92	2,99	3,08	3,17	3,29

Для упрощения алгоритма целесообразно аппроксимировать типичную для различных составов ПНГ гладкую нелинейную зависимость отношений (C^{H_2}/C^{CO}) от параметра α . Как следует из рис. 1 (см. третью сторону обложки), приближенная зависимость для пары кислород—ПНГ в окрестности рекомендуемого значения $\bar{\alpha} = 0,35$ имеет вид

$$\Delta\alpha(q) = 0,25\Delta(q). \quad (4)$$

Для обеспечения гарантированной сходимости вычислительного процесса целесообразно ввести коэффициент ослабления сигнала, например, в виде $\gamma = q^{-0,5}$. Тогда формула (4) примет вид

$$\Delta\alpha(q) = \gamma(q) \cdot 0,25 \cdot \Delta(q). \quad (5)$$

Шаг 7. Расчет скорректированного значения коэффициента избытка окислителя

$$\alpha(q) = \alpha(q-1) + \Delta\alpha(q). \quad (6)$$

Приведем доказательство сходимости процесса идентификации (5), (6) по типу стохастической аппроксимации [13, с. 301].

Покажем, что $\lim_{q \rightarrow \infty} \Delta\alpha(q) = 0$. Действительно, величина $\Delta(q)$ в формуле (5) ограничена по физическому смыслу как приращение соотношения объемных долей компонентов синтез-газа в составе углеводородного газа на выходе камеры сгорания ВТР.

В рассматриваемом случае, как следует из рис. 1 (см. третью сторону обложки), для заданного диапазона изменения параметра $\alpha = 0,35 \mp 0,05$ и изменения объемной доли метана в ПНГ в диапазоне от 0,55 до 0,95 максимальное значение $\Delta < 0,3$.

При $\gamma(q) = q^{-0,5}$ имеем $\lim_{q \rightarrow \infty} \gamma(q) = 0$, откуда следует исходное утверждение $\lim_{q \rightarrow \infty} \Delta\alpha(q) = 0$. Но тогда и $\alpha(q)$ в формуле (6) стремится к своему пределу при увеличении числа итераций q , что и требовалось доказать.

Шаг 8. Проверка технологического ограничения

$$|\alpha(q) - \bar{\alpha}| \leq 0,05. \quad (7)$$

Если условие (7) не выполняется, то в силу технологических ограничений реактор не может обеспечить желаемое качество синтез-газа. При корректном выборе номинального технологического режима невыполнение условия (7) является признаком нештатной ситуации, обусловленной резким изменением химического состава ПНГ, и требует вмешательства оператора.

В случае выполнения условия (7) имеем $q = q + 1$ и осуществляется возврат к шагу 3 алгоритма.

Шаг 9. Завершение расчета скорректированного значения коэффициента избытка окислителя, обеспечивающего требуемое соотношение компонентов синтез-газа при изменившемся составе ПНГ, при этом $\alpha(n) = \alpha(q)$.

Счетчик внутреннего цикла расчетов возвращается в исходное начальное состояние $q = 1$.

Шаг 10. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов значений массовых долей компонентов синтез-газа — водорода

$C_M^{H_2}$ и монооксида углерода C_M^{CO} — в водородсодержащем газе на выходе камеры сгорания реактора при $\alpha = \alpha(n)$.

Для пары кислород—ПНГ на рис. 2, 3 (см. третью сторону обложки) приведены типовые графики изменения соответствующих массовых долей.

Шаг 11. Расчет скорректированного значения массового расхода ПНГ:

$$m^{ПНГ}(n) = M / [(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_M^{H_2} + C_M^{CO})]. \quad (8)$$

Приведем вывод формулы (8). Запишем выражение массового расхода синтез-газа на выходе реактора в виде

$$M = M^Г(C_M^{H_2} + C_M^{CO}),$$

где $M^Г = m^K + m^{ПНГ}$ — суммарный массовый расход компонентов подачи на входе в реактор; $C_M^{H_2}$, C_M^{CO} — массовые доли компонентов синтез-газа в углеводородном газе на выходе камеры сгорания реактора.

Подставляя выражение $M^Г$, получим

$$M = (m^K + m^{ПНГ})(C_M^{H_2} + C_M^{CO}).$$

Из формулы (1) при известном коэффициенте избытка окислителя найдем

$$m^K = \alpha K_{m0} m^{ПНГ}.$$

Подставляя m^K в выражение M и преобразовывая, окончательно получим

$$m^{ПНГ} = M / [(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_M^{H_2} + C_M^{CO})].$$

Шаг 12. Расчет скорректированного значения массового расхода кислорода на основе формулы (1):

$$m^K(n) = \alpha(n)K_{m0}(n)m^{ПНГ}(n). \quad (9)$$

Таким образом, сначала на основе применения конечно сходящихся рекуррентных процедур по типу стохастической аппроксимации рассчитывается значение коэффициента избытка окислителя $\alpha(n)$, при котором достигается требуемое соотношение компонентов синтез-газа. Затем по формулам (8), (9) рассчитываются скорректированные значения массовых расходов подачи компонентов $m^K(n)$, $m^{ПНГ}(n)$, обеспечивающие заданную производительность реактора по синтез-газу.

Пример расчета

Параметры номинального режима: объемная доля метана в ПНГ $C^{ПНГ} = 0,85$, содержание паров воды составляет дополнительно 20 % к массе ПНГ, $K_{m0} = 3,17$, $\bar{\alpha} = 0,35$, $m^{ПНГ} = 145,12$ г/с, $m^K = 161,01$ г/с, давление газа в КС — 5,0 МПа. Заданный диапазон изменения объемных долей метана в ПНГ — от 0,55 до 0,95. Требуется обеспечить отношение компонентов синтез-газа $(C^{H_2}/C^{CO})_H = 1,75 \mp 0,03$, $\Delta_H = 0,03$ и производительность реактора по синтез-газу $M = 200$ г/с.

Проведем пошаговый расчет скорректированных сигналов управления.

1. Пусть на такте n опроса газоанализатора объемная доля метана составила $C^{\text{ПНГ}}(n) = 0,65$. Пусть также, не умаляя общности, значения настроек регуляторов-расходомеров и параметров технологического режима на $(n - 1)$ -м такте соответствовали номинальному режиму.

2. По данным таблицы найдем значение $K_{m0}(n) = 2,99$.

3. При $q = 1$ имеем $\alpha(q - 1 = 0) = \alpha(n - 1) = \bar{\alpha} = 0,35$. По рис. 1 (см. третью сторону обложки)

определим текущее значение $(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(1) = 1,63$.

4. $\Delta(1) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(1) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_H = 1,63 - 1,75 = -0,12$.

5. $|\Delta(1)| = 0,12 > 0,03$, откуда следует необходимость корректировки коэффициента избытка окислителя.

6. $\Delta\alpha(1) = 1 \cdot 0,25 \cdot \Delta(1) = 0,25 \cdot (-0,12) = -0,03$.

7. $\alpha(1) = \alpha(n - 1) + \Delta\alpha(1) = 0,35 - 0,03 = 0,32$.

8. $|\alpha(1) - \bar{\alpha}| = |0,35 - 0,32| = 0,03 \leq 0,05$, т. е. технологическое ограничение соблюдается и возможно продолжение расчета на шаге $q = q + 1 = 2$.

9. При $\alpha(1) = 0,32$ и $C^{\text{ПНГ}}(n) = 0,65$ найдем $(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(2) = 1,70$.

10. $\Delta(2) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(n = 2) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_H = 1,70 - 1,75 = -0,05$.

11. $|\Delta(2)| = 0,05 > 0,03$, откуда следует необходимость дальнейшей корректировки коэффициента избытка окислителя.

12. $\Delta\alpha(2) = 2^{-0,5} \cdot 0,25 \cdot \Delta(2) = 0,707 \cdot 0,25 \cdot (-0,05) \approx -0,01$.

13. $\alpha(2) = \alpha(1) + \Delta\alpha(2) = 0,32 - 0,01 = 0,31$.

14. $|\alpha(2) - \bar{\alpha}| = 0,35 - 0,31 = 0,04 \leq 0,05$, т. е. возможно продолжение расчета на шаге $q = q + 1 = 3$.

15. При $\alpha(2) = 0,31$ и $C^{\text{ПНГ}}(n) = 0,65$ найдем $(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(3) = 1,74$.

16. $\Delta(3) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(3) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_H = 1,74 - 1,75 = -0,01$.

17. $|\Delta(3)| = 0,01 < 0,03$, т. е. дальнейшей корректировки коэффициента избытка окислителя не требуется и переходим к шагу 9 алгоритма.

18. Итоговое скорректированное значение коэффициента избытка окислителя $\alpha(n) = \alpha(2) = 0,31$. Счетчик внутреннего цикла возвращаем в исходное состояние $q = 1$.

19. В соответствии с шагом 10 алгоритма по графикам на рис. 2, 3 (см. третью сторону обложки) определим при $\alpha(n) = 0,31$ и $C^{\text{ПНГ}}(n) = 0,65$ массовые концентрации водорода $C_M^{\text{H}_2} = 0,074$ и монооксида углерода $C_M^{\text{CO}} = 0,585$.

20. Рассчитаем скорректированное значение массового расхода ПНГ по формуле (8):

$$m^{\text{ПНГ}}(n) = M / [(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_M^{\text{H}_2} + C_M^{\text{CO}})] = 200 / [(1 + 0,31 \cdot 2,99) \cdot (0,074 + 0,585)] = 157,50 \text{ г/с.}$$

21. Рассчитаем скорректированное значение массового расхода кислорода по формуле (9):

$$m^{\text{K}}(n) = \alpha(n)K_{m0}(n)m^{\text{ПНГ}}(n) = 0,31 \cdot 2,99 \cdot 157,50 = 145,99 \text{ г/с.}$$

Заключение

Предложен метод управления технологическим процессом получения синтез-газа путем парциального окисления УВГ в управляемом высокотемпературном реакторе.

Метод базируется на использовании данных предварительных термодинамических расчетов по определению состава синтез-газа в различных режимах парциального окисления для заданных пар компонентов подачи УВГ и окислителя.

Путем связанного управления массовыми расходами компонентов подачи горючего и окислителя метод позволяет обеспечить желаемое соотношение компонентов синтез-газа — водорода и монооксида углерода — при одновременном поддержании требуемого массового расхода синтез-газа в условиях значительного изменения химического состава УВГ.

Приведен пример расчета корректирующего управления расходомерами-регуляторами подачи компонентов в камеру сгорания высокотемпературного реактора для пары ПНГ—кислород.

Доказана сходимость вычислительного алгоритма, обеспечивающего расчет скорректированного значения коэффициента избытка окислителя.

Метод имеет важное прикладное значение для предприятий нефтехимической промышленности, использующих синтез-газ в качестве промежуточного сырья для синтеза целевых продуктов. Он реализован в установке по производству водорода (рис. 4, см. третью сторону обложки) путем парциального окисления дизельного топлива кислородом [11].

Список литературы

1. Брагинский О. Б. Мировой нефтегазовый комплекс. М.: Наука, 2004. 605 с.
2. Арутюнов В. С. Роль нефтехимии в инновационном развитии России // Газохимия. 2008. № 1. С. 11—21.
3. Шурупов С. В. К вопросу утилизации попутного нефтяного газа // Газохимия. 2008. № 1. С. 42—48.
4. Колбановский Ю. А. Некоторые вопросы создания экологически чистых топлив для карбюраторных двигателей // Нефтехимия. 2002. Т. 42, № 2. С. 154—159.
5. Pena M. A., Gomes J. P., Fierro J. L. G. New catalytic routes for syngas and hydrogen production // Applied Catalysis. 1996. V. A144. P. 7—57.
6. Анискевич Ю. В., Красник В. В., Филимонов Ю. Н. Выбор режимных параметров процесса парциального газофазного окисления метана кислородом воздуха с целью получения син-

тез-газа требуемого состава // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82, Вып. 8. С. 1335—1341.

7. **Устройство** для получения синтез-газа. Патент РФ № 2523824.

8. **Устройство** генератора синтез-газа. Патент РФ № 2535121.

9. **Способ** получения синтез-газа. Патент РФ № 2521377.

10. **Реактор** для получения непредельных углеводородов, преимущественно этилена. Патент РФ № 2369431.

11. **Савченко Г. Б.** Способ получения водорода на основе критических технологий // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 1. С. 21—26.

12. **Термодинамические** и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 263 с.

13. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

Control of the Technological Process of the Synthesis Gas Production in a High-Temperature Reactor

Yu. V. Zagashvili, y.zagashvili@yandex.ru✉, J. V. Aniskevich, A. M. Kuzmin, A. A. Levikhin, G. B. Savchenko, VTR Co., St. Petersburg, 199226, Russian Federation

Corresponding author: Zagashvili Yury V., Ph. D., VTR Co., St. Petersburg, 199226, Russian Federation, e-mail: y.zagashvili@yandex.ru

Received on May 12, 2015

Accepted on May 29, 2015

Synthesis gas, which includes a mixture of hydrogen and carbon monoxide, is an important intermediate component in the synthesis of the commodity petrochemicals such as dimethyl ether, methanol, motor oils and fuels. One of the most promising technologies for production of the synthesis gas is partial oxidation of a hydrocarbon fuel with a lack of oxidant, which is realized in a controlled high temperature reactor (HTR). The authors propose a method for production of the synthesis gas of a given composition, which ensures the desired ratio of the volume fractions of hydrogen and carbon monoxide, and the required power of HTR. These parameters are especially important for the use of the hydrocarbon fuels with a varying concentration of components in their chemical composition, which is typical for the associated gas in the oil fields (PNG). For example, in PNG the volumetric content of methane as a component with the largest hydrogen number may vary within a wide range from 0.4 up to 0.95. Control of the technological process is implemented by an associated regulation of the components, which are used in HTR, — mass flows of the hydrocarbon fuel and oxidizer. In the control algorithm the operational information about the current chemical composition of the fuel and the preliminary data of the thermodynamic calculations of a given pair of the fuel-oxidizer are used. A computational algorithm was developed intended for implementation of the process in real time. It ensures convergence of the calculation process of the control signals. The method is illustrated by an example of the calculation process of a partial oxidation by APG oxygen.

Keywords: partial oxidation, hydrocarbon fuel, oxidant, synthesis gas, high temperature reactor, control of the composition of the synthesis gas, hydrogen, carbon monoxide, methane, thermodynamic calculations, ratio of components, coefficient of excess oxidant, chemical composition of fuel, reactor output

For citation:

Zagashvili Yu. V., Aniskevich J. V., Kuzmin A. M., Levikhin A. A., Savchenko G. B. Control of the Technological Process of the Synthesis Gas Production in a High-Temperature Reactor, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 704—709.

DOI: 10.17587/mau.16.704-709

Reference

1. **Braginskij O. B.** *Mirovoj neftegazovyy kompleks* (Global oil and gas complex), Moscow, Nauka, 2004, 605 p. (in Russian).

2. **Arutjunov V. S.** *Rol' neftehimii v innovacionnom razvitanii Rossii* (The role of petrochemicals in the innovative development of Russia), *Gazohimija*, 2008, no. 1, pp. 11—21 (in Russian).

3. **Shurupov S. V.** *K voprosu utilizatsii poputnogo nefljanogo gaza* (To the question of associated petroleum gas utilization), *Gazohimija*, 2008, no. 1, pp. 42—48 (in Russian).

4. **Kolbanovskij Ju. A.** *Nekotorye voprosy sozdaniya jekologicheskij chistyh topliv dlja karbjuratornyh dvigatelej* (Some questions of creating cleaner fuels for gasoline engines), *Neftehimija*, 2002, vol. 42, no. 2, pp. 154—159 (in Russian).

5. **Pena M. A., Gomes J. P., Fierro J. L. G.** New catalytic routes for syngas and hydrogen production, *Applied Catalysis*, 1996, vol. A144, pp. 7—57.

6. **Aniskevich Ju. V., Krasnik V. V., Filimonov Ju. N.** *Vybor rezhimnyh parametrov processa parcial'nogo gazofaznogo okislenija me-*

tana kislorodom vozduha s cel'ju poluchenija sintez-gaza trebuemogo sostava (The choice of regime parameters of the process gas-phase partial oxidation of methane with oxygen of air to produce syngas of desired composition), *Zhurnal Prikladnoj Himii*, 2009, vol. 82, iss. 8, S. 1335—1341 (in Russian).

7. **Ustrojstvo dlja poluchenija sintez-gaza** (A device for syngas producing), Patent RF № 2523824 (in Russian).

8. **Ustrojstvo generatora sintez-gaza** (The generator of syngas), Patent RF № 2535121 (in Russian).

9. **Sposob poluchenija sintez-gaza** (Method of syngas producing), Patent RF № 2521377 (in Russian).

10. **Reaktor dlja poluchenija nepredel'nyh uglevodorodov, preimushhestvenno jetilena** (The reactor for producing unsaturated hydrocarbons, preferably ethylene), Patent RF № 2369431 (in Russian).

11. **Savchenko G. B.** *Sposob poluchenija vodoroda na osnove kriticheskijh tehnologij* (A method for producing hydrogen based on critical technologies), *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2014, no. 1, pp. 21—26 (in Russian).

12. **Glushko V. P.** ed. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svojstva produktov sgoranija*, vol. 1 (Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products), Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, 263 p. (in Russian).

13. **Krasovskij A. A.** ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).

А. В. Шукалов^{1, 2}, ген. директор, доц., aviation78@mail.ru,

И. О. Жаринов^{1, 2}, д-р техн. наук, доц.,

руководитель учебно-научного центра, зав. кафедрой, igor_rabota@pisem.net,

О. О. Жаринов³, канд. техн. наук, доц., zharinov73@hotmail.ru,

М. О. Костишин², аспирант, job.max@me.com,

В. А. Нечаев^{1, 2}, главный конструктор, доц., postmaster@elavt.spb.ru,

¹ Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова,

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Алгоритмы формирования индикационного кадра авионики с использованием системы автоматизированного проектирования SCAD

Рассматривается задача проектирования индикационных кадров авионики в системе автоматизированного проектирования SCAD. Приводится схема автоматизированного рабочего места разработчика индикационных кадров. Предлагаются алгоритм формирования статического индикационного кадра в SCAD Display и алгоритм формирования динамического индикационного кадра в SCAD Suite.

Ключевые слова: авионика, средства индикации, индикационный кадр, SCAD, алгоритмы проектирования

Введение

Основным средством индикации пилотажно-навигационной информации на борту летательного аппарата (ЛА) в настоящее время является многофункциональный цветной индикатор (МФЦИ). МФЦИ представляет собой [1–3] программно управляемое устройство, состоящее из набора конструктивно-функциональных модулей (вычислительного, ввода-вывода, графического, напряжений и пр.) и жидкокристаллической (ЖК) панели.

Изображение на ЖК панели формируется программно средствами графического модуля [4, 5] и состоит из последовательно сменяющихся друг друга индикационных кадров. Индикационный кадр — законченное информационное визуальное сообщение, которое в заданный момент времени может быть целиком размещено на экране ЖК панели МФЦИ. Индикационный кадр состоит из одного или нескольких фрагментов изображения — модулей изображения.

Модуль изображения — связанные между собой элементы изображения, которые характеризуются одинаковым правилом перемещения на экране. Модуль изображения может состоять из одного или нескольких элементов изображения. Элементы изображения — простейшие составляющие изображения, с помощью и на основе которых может

строиться любой модуль изображения и индикационный кадр. Элементом изображения являются, например, точка, символ (знак алфавита или цифра), линия, дуга, окружность и т. д.

Модуль изображения может быть статическим или динамическим. Статический модуль — модуль, в котором все элементы изображения в процессе формирования индикационного кадра не изменяют ни своего положения на экране, ни своего значения. Динамический модуль — модуль, в котором хотя бы один элемент изображения в процессе формирования изображения от одного индикационного кадра к другому изменяет свое положение на экране, либо числовое значение из-за движения ЛА.

Основная задача разработчика [6–8] индикационных кадров МФЦИ заключается в поиске инструментальных средств и в разработке алгоритмов, позволяющих автоматизировать процесс создания кода функционального программного обеспечения (ФПО), обеспечивающего вывод изображения пилотажно-навигационной информации на ЖК панель МФЦИ.

1. Автоматизированное рабочее место разработчика индикационных кадров

Система автоматизированного проектирования (САПР) SCAD, разработанная компанией Esterel

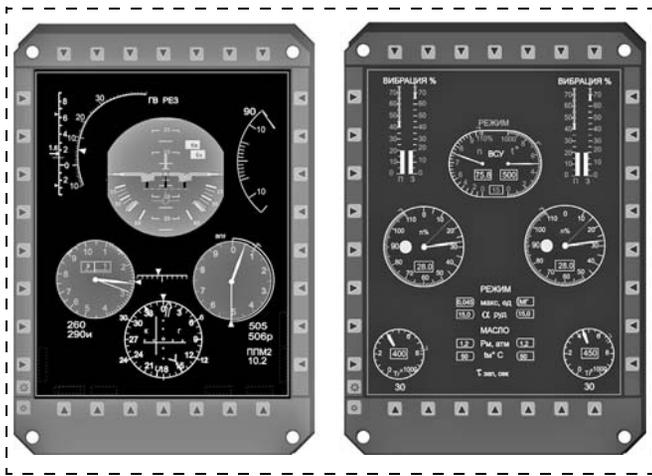


Рис. 1. Индикационные кадры авионики на экране МФЦИ, созданные в SCADE Display (примеры)

Technologies (США), включает программно реализованные инструментальные средства:

- SCADE Suite — среда для автоматизированной разработки, симуляции, верификации и генерации кода программ;
- SCADE LifeCycle — среда для автоматизированного документирования проектов и управления жизненным циклом проекта;
- SCADE System — среда для управления архитектурой проекта по стандартам SysML, Eclipse;
- SCADE Display — среда графического интерфейса САПР с поддержкой стандарта OpenGL Safety Critical, используемые разработчиками индикационных кадров для автоматизированной генерации кода ФПО, обеспечивающего вывод пилотажно-навигационной информации на ЖК панель МФЦИ. Примеры индикационных кадров МФЦИ, созданные в САПР SCADE, приведены на рис. 1.

Фрагменты кода ФПО формируются в САПР на основе принципа соответствия элементов изображения реализованной в SCADE Display библиотеки графических примитивов, отображаемых пользователю на инструментальной ЭВМ в виде шкал, дуг, окружностей, линий и пр. [9–11], упорядоченным массивам команд и данных, выполненным в синтаксисе языка С или Ada и сохраняемым пользователем на жестком диске инструментальной ЭВМ в виде текстовых файлов.

Пользователь SCADE Display имеет возможность рисовать на экране инструментальной ЭВМ желаемый индикационный кадр авионики, как, например, в графическом

редакторе Corel Draw или Visio, а программные средства SCADE Suite автоматически генерируют эквивалентный фрагмент кода ФПО в системе команд программно-управляемого графического контроллера МФЦИ, обеспечивающего построение на экране МФЦИ этого индикационного кадра.

Таким образом, пользователь САПР SCADE в составе автоматизированного рабочего места (АРМ) формирует статический индикационный кадр, соответствующий требованиям технического задания (ТЗ), с распределенными в пределах экрана "неподвижными" графическими примитивами и фрагмент кода ФПО для его построения на экране МФЦИ. Состав и основные компоненты АРМ приведены на рис. 2. АРМ включает компоненты программного, технического и информационного обеспечения САПР.

Динамику индикационному кадру, т. е. изменение на экране числовых значений пилотажно-навигационных параметров, соответствующее движению летательного аппарата, обеспечивает компонент SCADE System.

В компоненте SCADE System пользователю доступно виртуальное адресное пространство, в котором необходимо задать адреса физических устройств ввода-вывода МФЦИ и параметры протокола обмена данными МФЦИ с абонентами авиационного комплекса. Задание адресов устройств и параметров обмена необходимо для организации связи отображаемого на экране МФЦИ пилотажно-навигационного параметра и соответствующего ему источника информации, осуществляющего измерение на борту летательного аппарата.

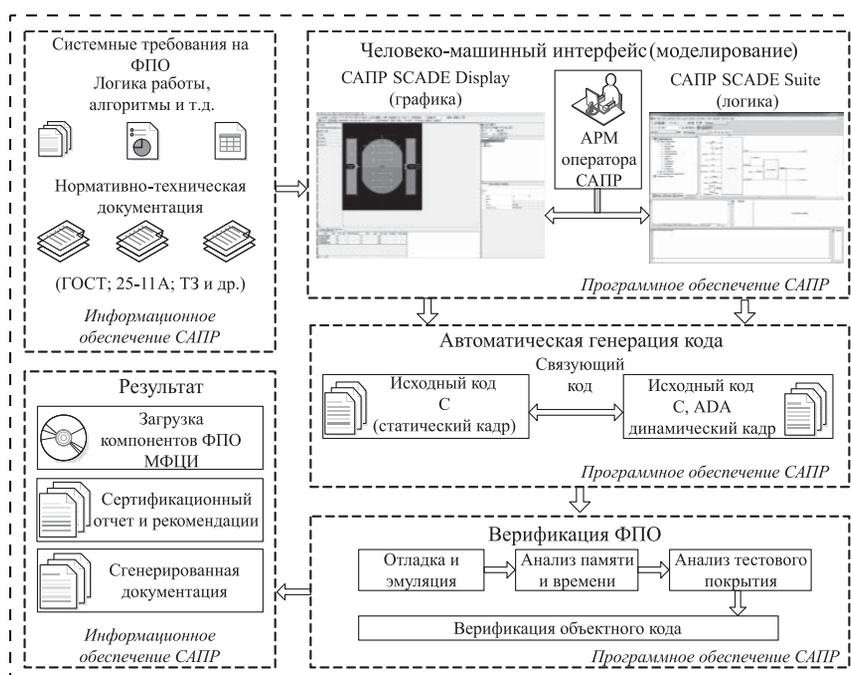


Рис. 2. Автоматизированное рабочее место пользователя САПР SCADE

2. Алгоритмы формирования статических и динамических индикационных кадров в САПР SCADA

Алгоритм, представленный на рис. 3, описывает работу разработчика индикационных кадров МФЦИ в САПР SCADA Display.

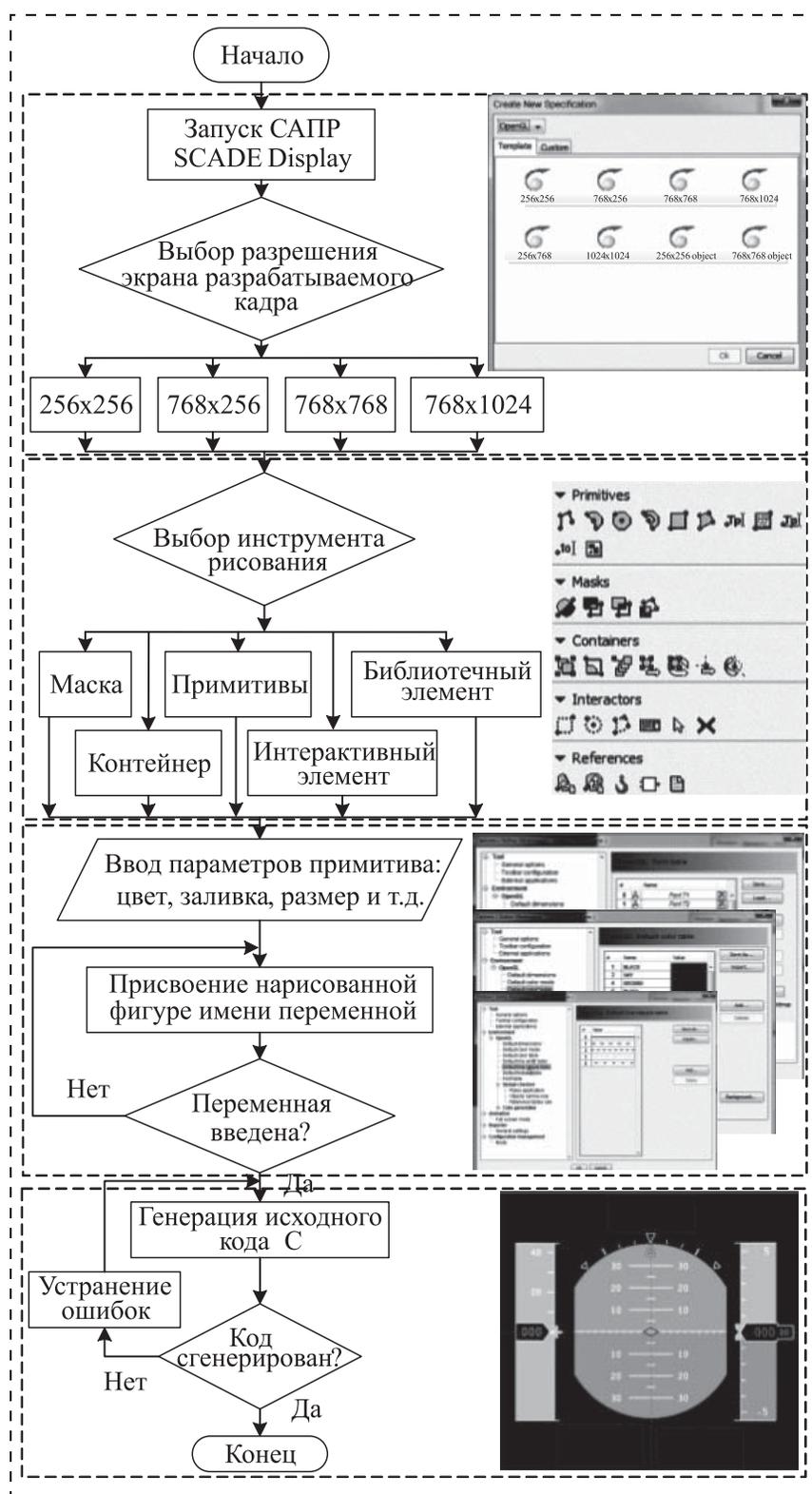


Рис. 3. Алгоритм формирования статического индикационного кадра МФЦИ в SCADA Display

После запуска SCADA Display разработчик осуществляет выбор в опции меню "Create New Specification" разрешения ЖК панели МФЦИ, на которую предполагается вывод разрабатываемого индикационного кадра. Пользователю доступны для выбора в опции меню следующие разрешения: 256 × 256, 256 × 768, 768 × 256, 768 × 768, 768 × 1024, 1024 × 1024 пикселей.

Установка разрешения имеет важное практическое значение, так как при фиксированных габаритных размерах ЖК панели один и тот же индикационный кадр, отображаемый на экране с разным разрешением, будет обладать различными показателями надежности восприятия индицируемой информации. При увеличении разрешения ЖК панели отображаемые на экране элементы изображения (например, символы или окружности) будут уменьшаться в размерах, линии станут более тонкими и т. д. Поэтому разработчику в процессе проектирования на экране инструментальной ЭВМ необходимо наблюдать индикационный кадр именно таким, каким он будет восприниматься летным составом в эксплуатации ЛА.

Для формирования статического индикационного кадра в распоряжении разработчика имеются опции специальной панели инструментов: "Primitives" (линия, круг, квадрат), "Masks" (маска), "Containers" (контейнер), "Inter actors" (интерактивные элементы), "References" (библиотека элементов), которые содержат мнемонические изображения графических примитивов, необходимых для подготовки автоматизированным способом индикационного кадра авионики.

Математические средства САПР SCADA Display позволяют каждому элементу изображения (линия, счетчик, шкала и т. д.) индикационного кадра МФЦИ присвоить значение параметра-переменной, которое заносится в генерируемый код ФПО и впоследствии передается в SCADA Suite для установления соответствия значения отображаемого на экране МФЦИ параметра результату измерения, получаемому от датчиков информационно-измерительной системы ЛА.

Каждому отображаемому элементу изображения, входящему в состав

индикационного кадра, разработчик устанавливает в пункте меню "Options" атрибуты: цвет, заливка, размер, пунктир, мерцание и т. д. Результатом работы разработчика с САПР SCADE Display является графическое изображение статического индикационного кадра, каждому элементу которого присвоено значение параметра-переменной и значения атрибутов, а также код ФПО в синтаксисе языка C или Ada, обеспечивающий вывод синтезированного индикационного кадра на ЖК панель МФЦИ.

Алгоритм, представленный на рис. 4, описывает работу разработчика индикационных кадров МФЦИ с САПР SCADE Suite. Действия разработчика с САПР SCADE Suite направлены на создание логической связи отображаемых на ЖК панели графических примитивов результатам измерения пилотажно-навигационных параметров.

Логическая связь устанавливается с помощью операторов булевой алгебры, объединяющих атрибуты. В окне рабочей программы САПР разработчик устанавливает также диапазон изменений значений каждого отображаемого параметра. Для элементов, атрибуты которых зависят от текущего значения физического параметра, характеризующего движение ЛА или состояние соответствующей самолетной системы, разработчик задает пороговые значения, при достижении которых может, например, измениться цвет отображаемого символа или включиться режим его мерцания при отображении на экране МФЦИ.

По результатам проектирования динамического индикационного кадра в SCADE Suite генерируется код ФПО. Исходными данными для создания кода ФПО в САПР SCADE Suite является программный код, полученный в SCADE Display. Критерием качества проектирования индикационных кадров МФЦИ является соответствие ФПО, обеспечивающего вывод изображения на ЖК панель, требованиям ГОСТ Р 51904—2002 "Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию".

Заключение

Разработка индикационных кадров авионики и ФПО для их отображения на ЖК панели МФЦИ — трудоемкий и длительный процесс, основанный на процедурах принятия проектных решений. В от-

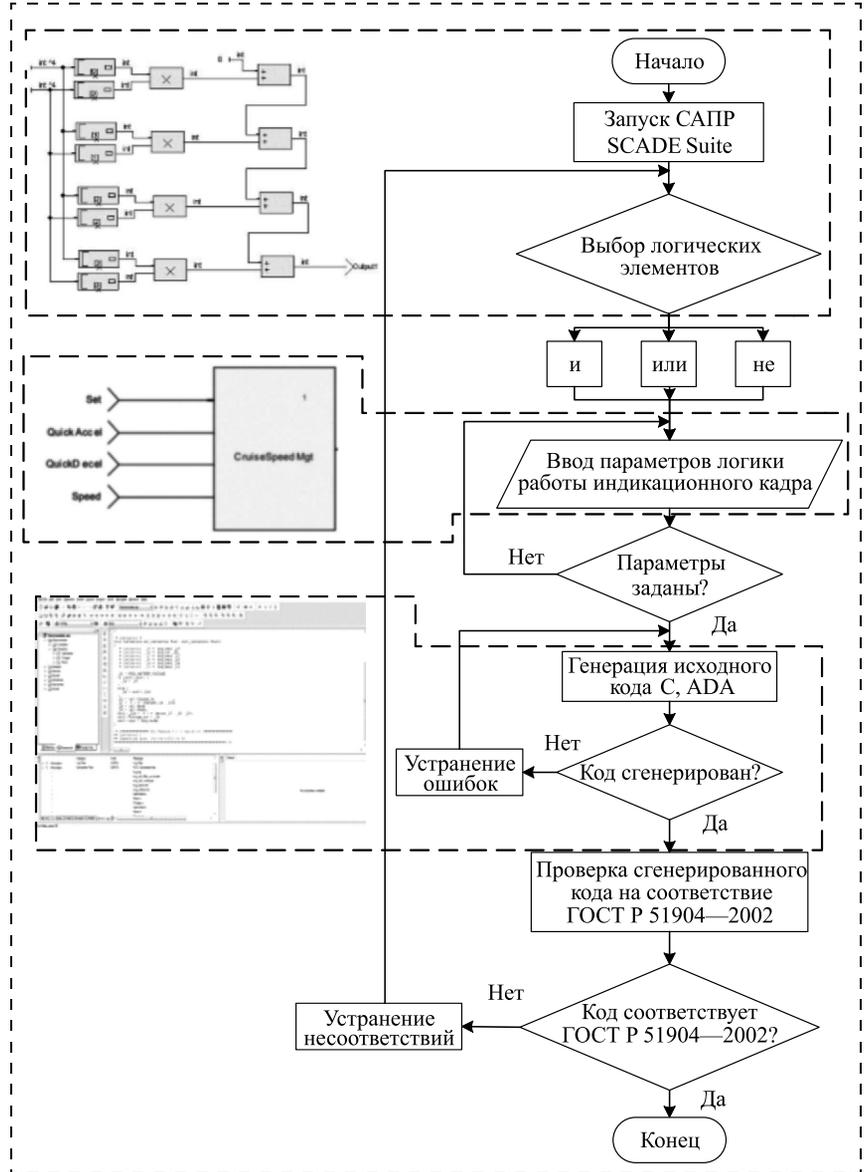


Рис. 4. Алгоритм формирования динамического индикационного кадра МФЦИ в SCADE Suite

сутствие готовых образцов МФЦИ на начальных этапах проектирования и необходимых инструментальных средств поддержки проектов разработчики авионики вынуждены создавать ФПО и проводить его тестирование и верификацию на АРМ с использованием компонентов САПР, программно эмулирующих работу графического модуля МФЦИ.

Использование САПР SCADE, обеспечивающей автоматизацию процессов создания динамических индикационных кадров МФЦИ и кода ФПО, позволяет:

- существенно сократить время проектирования ФПО;
- ускорить процесс согласования индикационных кадров с заказчиком — головной организацией, интегрирующей борт ЛА в целом;
- повысить удобство внесения изменений в проект и сопровождение проекта в эксплуатации,

а также не требует от разработчика МФЦИ хороших навыков программирования.

По окончании создания динамических индикационных кадров МФЦИ необходимо проводить светотехнические испытания [12—18] на образцах МФЦИ в целях придания изображению заданных эргономических свойств (в частности, подбор цветовой палитры, обеспечивающей повышенный контраст изображения, и др.).

Список литературы

1. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 2005, 144 с.
2. **Парамонов П. П., Копорский Н. С., Видин Б. В., Жаринов И. О.** Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 3. С. 238—245.
3. **Жаринов И. О., Емец Р. Б.** Индикационное оборудование в авиации XXI века // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2003. № 11. С. 193—195.
4. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю.** Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
5. **Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О.** Теория и практика статистического анализа картографических изображений в системах навигации пилотируемых летательных аппаратов // Датчики и системы. 2001. № 8. С. 15—19.
6. **Гатчин Ю. А., Жаринов И. О.** Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. М.: Машиностроение, 2010. 224 с.
7. **Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Дейко М. С.** Принципы построения отраслевой системы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6. С. 111—117.
8. **Сабо Ю. И., Жаринов И. О.** Критерий подобия проектных решений требованиям технического задания в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3. С. 57—63.
9. **Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Архитектура программного обеспечения автоматизированного рабочего места разработчика бортового авиационного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2. С. 140—141.
10. **Дейко М. С., Жаринов И. О.** Применение симплекс-метода и метода искусственного базиса при проектировании бортового приборного оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1. С. 124—129.
11. **Костишин М. О., Шукалов А. В., Парамонов П. П., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Алгоритмы автоматизации конфигурирования загрузочных компонентов аэронавигационной информации и геоинформационных данных авионики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 64—72.
12. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование распределения оценки разрешающей способности преобразования Грассмана в системах кодирования цвета, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 8. С. 40—47.
13. **Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование визуальных характеристик средств отображения пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных в авионике // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 61—67.
14. **Шукалов А. В., Парамонов П. П., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Костишин М. О.** Алгоритм и методика автоматизации процедуры оценивания координат цветности элементов изображения бортовых средств индикации в авионике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 3. С. 195—204.
15. **Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б.** Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.
16. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Оценка параметров математической модели цветопередачи жидкокристаллической панели // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2. С. 49—56.
17. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Оценка инструментальной погрешности косвенного измерения координат цвета в цветовой модели данных, применяемой в авионике // Программная инженерия. 2014. № 12. С. 39—46.
18. **Gatchin Y. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Zharinov O. O.** Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, no. 5. P. 197—210.

Algorithms for Formation of Indication Pictures in Avionic Equipment with the Use of SCADE Integrated Design Environment

A. V. Shukalov^{1, 2}, aviation78@mail.ru, **I. O. Zharinov**^{1, 2}, igor_rabota@pisem.net✉, **O. O. Zharinov**³, zharinov73@hotmail.ru, **M. O. Kostishin**², job.max@me.com, **V. A. Nechayev**^{1, 2}, postmaster@elavt.spb.ru,

¹ St. Petersburg Electroavtomatika Scientific Design Bureau named after P. A. Efimov, St. Petersburg, 198095, Russian Federation,

² St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

³ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author: Zharinov Igor O., D. Sc., Associate Professor, Chef of Department, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, 197101, Russian Federation, Head of the Training-Research Center, St. Petersburg Electroavtomatika Scientific Design Bureau named after P. A. Efimov, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

Received on May 05, 2015

Accepted on May 25, 2015

In this article the problem of designing of indication pictures in avionics with the use of SCADE integrated design environment is considered. The SCADE design environment includes such implemented tools as SCADE Suite, SCADE LifeCycle, SCADE System and SCADE Display with broad functional capabilities, which are to be used by the developers of the indication pictures for an automated code generation of the functional software, which ensures displaying of the navigation information on a liquid crystal panel of the onboard indication equipment. The authors propose a structural scheme of an automated workstation for the developers of the indication pictures. The workstation includes software components, technical and information support tools. The following results are offered: an algorithm for formation of a static indication frame with the use of SCADE Display and an algorithm for formation of a dynamic indication frame using SCADE Suite tool. The static indication frame is a picture with a set of "frozen" graphic primitives (lines, symbols, circles, etc.) placed within the field of a liquid-crystal display. The dynamic indication frame, i.e., the changing numeric values of the navigation parameters corresponding to the movement of the aircraft, displayed on a screen, is implemented by the tools of SCADE System software. In the SCADE System software components a user can have access to the virtual address space, in which it is necessary to specify the addresses of the physical i/o devices of the on-board indication equipment and also to set parameters of the communication protocol, which is supported by the subscribers within the avionic equipment. Specification of the addresses of i/o devices and parameters of protocols in SCADE Display and SCADE Suite components is necessary for establishment of a logical link between each displayed navigation parameter and its corresponding source within the onboard equipment, which generates the code of a physically measured value.

Keywords: avionics, indication equipment, indication frame, SCADE, designing algorithms

For citation:

Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O., Nechayev V. A. Algorithms for Formation of Indication Pictures in Avionic Equipment with the Use of SCADE Integrated Design Environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 710—715.

DOI: 10.17587/mau.16.710-715

Reference

- Zharinov I. O., Zharinov O. O. Bortovye sredstva otobrazheniya informacii na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah (Onboard display on flat liquid crystal panels), Saint-Petersburg, *Informacionno-Upravljajushhie Sistemy*, 2005, 144 p. (in Russian).
- Paramonov P. P., Koporskiy N. S., Vidin B. V., Zharinov I. O. Mnogofunkcional'nye indikatory na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah: naukoemkie apparatno-programmnye resheniya (The multi-functional displays on LCD flat panels: high-tech hardware and software solutions), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2004, no. 3, pp. 238—245 (in Russian).
- Zharinov I. O., Emec R. B. Indikacionnoe oborudovanie v aviacii XXI-ogo veka (Aviation XXI-st century), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2003, no. 11, pp. 193—195 (in Russian).
- Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Ju. Strukturnyj analiz i sintez graficheskikh izobrazhenij na jekranah sovremennykh sredstv bortovoj indikacii na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah (Structural analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern means of onboard display on LCD flat panels), *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50—57 (in Russian).
- Paramonov P. P., Il'chenko Ju. A., Zharinov I. O. Teorija i praktika statisticheskogo analiza kartograficheskikh izobrazhenij v sistemah navigacii pilot-iruemykh letatel'nykh apparatov (Theory and practice of statistical analysis of cartographic images in the navigation systems of manned aircraft), *Datchiki i Sistemy*, 2001, no. 8, pp. 15—19 (in Russian).
- Gatchin Ju. A., Zharinov I. O. Osnovy proektirovaniya vychislitel'nykh sistem integrirovannoj modul'noj avioniki (Basics of designing computer systems integrated modular avionics), Moscow, Mashinostroenie, 2010, 224 p. (in Russian).
- Paramonov P. P., Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Dejko M. S. Principy postroeniya otraslevoj sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v aviacionnom priborostroenii (Principles of branch system creation for the automated design in aviation instrumentation), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2012, no. 6, pp. 111—117 (in Russian).
- Sabo Ju. I., Zharinov I. O. Kriterij podobija proektnykh reshenij trebovanijam tehnikeskogo zadaniya v avionike (Similarity criterion of design decisions to requirements of the technical project in avionics), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2010, no. 3, pp. 57—63 (in Russian).
- Gatchin Ju. A., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Arhitektura programmnogo obespecheniya avtomatizirovannogo rabocheho mesta razrabotchika bortovogo aviacionnogo oborudovanija (Software architecture for the automated workplace of the onboard aviation equipment developer), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2012, no. 2, pp. 140—141 (in Russian).
- Dejko M. S., Zharinov I. O. Primenenie simpleks metoda i metoda iskusstvennogo bazisa pri proektirovanii bortovogo pribornogo oborudovanija (Simplex-method and artificial basis method application for onboard equipment designs), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 1, pp. 124—129 (in Russian).
- Kostishin M. O., Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Algoritmy avtomatizacii konfigurirovaniya zagruzochnykh komponentov ajeronavigacionnoj informacii i geoinformacionnykh dannykh avioniki (Algorithms automation configuration bootable components aeronautical information and geoinformation data avionics), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 64—72 (in Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. Issledovanie raspredelenija ocenki razreshajushhej sposobnosti preobrazovanija Grassmana v sisteme kadrovaniya cveta, primenjaemykh v avionike (Research of properties of an assessment of the resolution of Grassmann's transformation in chromaticity coding systems, applied in avionic equipment), *Programmnaia Inzhenerija*, 2014, no. 8, pp. 40—47 (in Russian).
- Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Issledovanie vizual'nykh harakteristik sredstv otobrazhenija pilotazhno-navigacionnykh parametrov i geoinformacionnykh dannykh v avionike (The study of the visual characteristics of the display means of navigation parameters and GIS data in avionics), *Informacionno-Upravljajushhie Sistemy*, 2014, no. 4, pp. 61—67 (in Russian).
- Shukalov A. V., Paramonov P. P., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O. Algoritmi i metodika avtomatizacii procedury ocenivaniya koordinat zvetnosti jelementov izobrazhenija bortovykh sredstv indikacii v avionike (Algorithm and methodology for automation of estimation procedure of chromaticity coordinates of pixel airborne avionics display), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, no. 16, pp. 195—204 (in Russian).
- Paramonov P. P., Kononov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B. Realizatsija struktury dannykh, ispol'zuemykh pri formirovanii indikacionnogo kadra v bortovykh sistemah kartograficheskoi informacii (Implementation of data structures that are used to generate a display frame in airborne systems map information), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnyh Tehnologij, Mehaniki i Optiki*, 2013, no. 2, pp. 165—167 (in Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. Ocenka parametrov matematicheskoi modeli cvetopredachi zhidkokristallicheskoj paneli (Evaluation of parameters of the mathematical model of color response performance of LCD-panel), *Informacionno-Upravljajushhie Sistemy*, 2015, no. 2, pp. 49—56 (in Russian).
- Zharinov I. O., Zharinov O. O. Ocenka instrumental'noj pogreshnosti kosvennogo izmerenija koordinat cveta v cvetovoj modeli dannykh, primenjaemoj v avionike (The evaluation of hardware-caused inaccuracy of indirect measurements of chromaticity coordinates in color model data used in avionics), *Programmnaia Inzhenerija*, 2014, no. 12, pp. 39—46 (in Russian).
- Gatchin Y. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Zharinov O. O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems, *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 197—210.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., devyatis@iacp.dvo.ru,
К. А. Числов, канд. техн. наук, науч. сотр., kirillche@rambler.ru,
 Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Модель конкурентного нейроморфного комплексирования информации в интегрированной спутниково-инерциальной навигационной системе¹

Показано, каким образом при бортовом многопозиционном приеме информации навигационной спутниковой системы и по инерциальной информации, доставляемой измерениями трех ньютонометров с ортогональными осями чувствительности, образуемыми подвижным координатный трехгранник, у последнего могут быть определены ориентация и вектор угловой скорости вращения в проекциях на собственные оси.

Математическая модель обратной задачи вида "состояние— измерение" представлена: 1) динамической группой уравнений функционирования безгироскопной инерциальной навигационной системы с вектором состояний, включающим координаты, удельные импульсы и угловые скорости вращения приборного трехгранника и 2) уравнениями измерений координат места объекта, отождествляемых с координатами вершины трехгранника в проекциях на его оси.

Динамическое псевдообращение (решение) задачи реализуется нейросетью, в основу модели которой положен алгоритм калмановского типа при его мультимодельном представлении, допускающем суждение о равноправной конкуренции моделей в процессе оценки вектора состояния. Вводятся понятия "ядерного" и "безъядерного" механизмов настройки синаптических коэффициентов нейросети. Выдвигаются гипотезы о возможности трансляции характеристик, используемых при описании искусственной нейросети, в представление об организации и функционировании популяций биологических ("живых") нейронов.

Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: угловая скорость, ньютонометр, навигационная спутниковая система, нейроморфизм, обратная задача, алгоритм решения

Введение

В работе [1] рассматривалась интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система с функцией оценки напряженности гравитационного поля, в которой инерциальная навигационная система (ИНС) представлена двумя трехкомпонентными блоками инерциальных измерителей — ньютонометров (акселерометров) и гироскопических датчиков угловых скоростей — с осями чувствительности, совпадающими с осями ортогональной приборной системы отсчета, а навигационная спутниковая система (НСС) — однопозиционным приемником, размещенным в начале приборной системы отсчета и доставляющим полную (три координаты) позиционную информацию о своем местоположении в системе отсчета, жестко связанной с Землей. Кроме того, в работе [1] указывалось, что ориентация приборного координатного трехгранника может быть определена независимо, например астросистемой.

В настоящей работе предложена и исследована модель интегрированной системы, включающая безгироскопную ИНС и систему бортового многопозиционного приема информации НСС, что, как показано, дает возможность не только знать ориентацию приборного трехгранника, но и восполнить отсутствие гироскопических приборов для оценки вектора угловой скорости его вращения, т. е., в ко-

нечном итоге, определить все двенадцать параметров движения объекта как твердого тела.

Основные модельные представления

Введем следующие правые прямоугольные системы отсчета: $o\eta = o\eta_1\eta_2\eta_3$ — инерциальная система с началом в центре o Земли и осями, направленными на удаленные звезды; $o\xi = o\xi_1\xi_2\xi_3$ — система, жестко связанная с Землей; компоненты вектора в $o\eta$ и $o\xi$ связаны линейным преобразованием $\xi = A^{\xi\eta}\eta$ с известной матрицей $A^{\xi\eta}$ размерности 3×3 ; $\tilde{o}q = \tilde{o}q_1q_2q_3$ — бортовая приборная система отсчета с осями, совпадающими с осями чувствительности линейных ньютонометров, размещенных в точке \tilde{o} , с движением которой отождествляется траекторное (поступательное) движение технологической платформы, соответственно, $q = A^{q\eta}\eta$ и $q = A^{q\xi}\xi$, так что $A^{q\eta} = A^{q\xi}A^{\xi\eta}$.

Кратко остановимся на возможностях бортового многопозиционного приема информации НСС. Пусть такой прием осуществляется в точках a, b, c, d , жестко привязанных к приборному трехграннику oq , так что точка a совпадает с точкой \tilde{o} , а точки b, c, d размещены на осях (так примем, не нарушая общности) соответственно $\tilde{o}q_1, \tilde{o}q_2, \tilde{o}q_3$ с равным удалением каждой на расстояние l от точки \tilde{o} в положительных направлениях. Бортовые приемные устройства НСС выдают информацию о векторах ξ_i , $i = a, b, c, d$ (следовательно, и $q = A^{q\xi}\xi$), которая далее может быть использована для построения матрицы $A^{q\xi}$, а следовательно, и $A^{q\eta}$.

¹ Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований "Дальний Восток" (проект 15-1-4-006 о).

Для оценки вектора абсолютной угловой скорости $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ вращения приборного трехгранника $\tilde{d}q$, а также для сглаживания отрицательных последствий ограничений на точность и частоту измерений, характерных для НСС, обратимся к информации о движении ТП, доставляемой трехкомпонентным блоком ньютонометров, измеряющим вектор кажущегося ускорения, или, по существу, вектор удельных сил негравитационной природы. Таким образом, ориентируемся на рассмотрение складывающейся информационной ситуации с позиций метода инерциальной навигации. Тогда, полагая, что ориентация трехгранника $\tilde{d}q$ определена (это обсуждено выше), из двух групп базовых уравнений метода, динамической и кинематической [2], составляющих суть математической модели ИНС, может быть оставлена только первая из них — дифференциальные уравнения движения материальной точки, с которой совмещена точка \tilde{d} . Дополнив эти уравнения связями — уравнениями идеальных измерений места точки \tilde{d} , образуем объединенную систему уравнений в качестве идеализированной математической модели интегрированной системы и представим задачу наблюдения движения в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k q_j + p_i, \quad q_i(0) = q_i, \quad 0; \\ \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k p_j + G_i(\mathbf{q}) + F_i, \quad p_i(0) = p_i, \quad 0; \\ z &= q_i, \quad i, j, k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где e_{ikj} — псевдотензор Леви—Чивита; $\mathbf{q} = (q_i)$, $\mathbf{p} = (p_i)$, $\mathbf{z} = (z_i)$ — векторы соответственно координат, удельных импульсов и измерений; $\mathbf{F} = (F_i)$ и $\mathbf{G} = (G_i(\mathbf{q}))$ — соответственно вектор удельных сил негравитационной природы (измеряемых ньютонометрами) и напряженность гравитационного поля (с известной, так полагаем, моделью). Целью решения поставленной задачи является оценка вектора $(\mathbf{q}^T, \mathbf{p}^T, \omega^T)^T$ в реальных условиях присутствия погрешностей измерений, T — символ транспонирования векторов и матриц.

Далее, следуя вполне оправдавшей себя на практике традиции метода инерциальной навигации [3], перейдем к модели задачи коррекции, полагая, что можно указать некоторые приближения искомым параметрам и перейти к линейной задаче оценки их вариаций. Тогда, учитывая (1), получаем модель следующего вида:

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta q_j + \delta p_i + e_{ikj} q_k \delta \omega_j, \quad \delta q_i(0) = \delta q_i, \quad 0; \\ \delta \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta p_j + e_{ikj} p_k \delta \omega_j + \Gamma_{ij} \varepsilon_j + f_i, \quad \delta p_i(0) = \delta p_i, \quad 0; \\ \delta \dot{\omega}_i &= \chi_i(t), \quad \delta \omega_i(0) = \delta \omega_i, \quad 0; \\ \delta z_i &= \delta q_i + \varepsilon_i, \quad i, j, k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Gamma = (\Gamma_{ij}) = (\partial G_i / \partial q_j)$ — гессиан силовой функции гравитационного поля; $\mathbf{f} = (f_i)$, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_i)$ — векторы соответственно инструментальных погрешностей ньютонометров и погрешностей оценок координат

места ТП по данным НСС; кроме того, здесь предполагается, что при реализации модели гравитационного поля выполнено замещение $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ на $\mathbf{G}(\mathbf{z})$, $\chi(t) = (\chi_i(t))$ — скорость изменения вектора $\delta \omega = (\delta \omega_i)$.

Для удобства последующих рассуждений представим систему (2) в общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{C} \delta \mathbf{x} + \mathbf{w}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ \delta \mathbf{z} &= \mathbf{H} \delta \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta \mathbf{x} = (\delta \mathbf{q}^T, \delta \mathbf{p}^T, \delta \omega^T)^T$ — вектор, подлежащий определению в целях приплюсовывания его к вектору приближенных значений соответствующих навигационных параметров (т. е. \mathbf{q} , \mathbf{p} , ω) и, таким образом, получения текущих значений последних; \mathbf{C} и \mathbf{H} — матрицы соответствующих коэффициентов при компонентах вектора $\delta \mathbf{x}$; $\mathbf{w} = \mathbf{q}(\mathbf{f}, \boldsymbol{\varepsilon})$ — вектор немоделируемых компонент системы (1), имеющих случайный характер и неизвестные статистики.

Завершая данный раздел статьи, заметим, что для разрешимости задач типа (3) (обратных задач по сути) необходимо, чтобы пара матриц (\mathbf{C}, \mathbf{H}) или (Φ, \mathbf{H}) была наблюдаема [4] (здесь Φ — переходная матрица состояния системы линейных уравнений эволюции вектора $\delta \mathbf{x}$ и, что существенно, ядро интегрального преобразования в известной формуле Коши для решения этой системы уравнений).

Модели алгоритма динамического обращения

Сначала обратимся к концепции квазистатического алгоритма решения задачи (2). Суть ее заключается в формировании системы линейных алгебраических уравнений для точечной оценки вектора \mathbf{x} в заданный момент времени t^* на некотором скользящем или расширяющемся интервале времени с объемом измерений на нем, большим, чем размерность вектора \mathbf{x} , и матрицей \mathbf{N} связи "состояние—измерение", образуемой из блоков $\mathbf{H}(t_i)\Phi(t_i, t^*)$, $i = \overline{1, M}$. В этом случае матрица \mathbf{N} вполне заменяет калмановскую матрицу наблюдаемости [4], а ее вычисленное спектральное число обусловленности (μ) может служить конструктивной оценкой разрешимости обратной задачи (3). Именно в таком ограниченном аспекте этот алгоритм только и рассматривается здесь (со ссылкой на прецедент [5]) в следующем за этим разделе настоящей статьи.

Переходя теперь непосредственно к алгоритму динамического обращения, обратимся, как и в работе [1], к его нейросетевой концепции, взяв за основу линейный динамический алгоритм (комплементарный модели (3)) следующего вида:

$$\delta \dot{\mathbf{x}}^* = \tilde{\mathbf{C}} \delta \mathbf{x}^* + \mathbf{K} \delta \mathbf{z}, \quad \delta \mathbf{x}^*(0) = \delta \mathbf{x}_0^*, \quad (4)$$

где $\delta \mathbf{x}^*$ — текущая оценка вектора $\delta \mathbf{x}$; \mathbf{K} — матрица синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум квадратичного критерия $J = \|\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x}^*\|^2$; $\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} - \mathbf{K} \mathbf{H}$.

Как видно из соотношения (4), одновременно с настройкой синаптических коэффициентов при

обработке информации, доставляемой вектором δz , происходит и изменение матрицы \mathbf{C} , или ядра $\tilde{\Phi}$ соответствующего интегрального преобразования, если представить решение системы уравнений (4) в форме Коши. Подобный же, заметим, процесс изменения функциональных (не путать с клеточными [6]) ядер популяций биологических нейронов, отождествляемый с обучением, происходит, что вполне можно предположить, и при усвоении внешней информации "живыми" (биологическими) системами.

Настройка матрицы \mathbf{K} связана с решением нескольких содержательно и по форме близких экстремальных задач. Решение первой из них — $\mathbf{K} = \arg \min_{\Omega_k} J$; Ω_k — область значений \mathbf{K} — предполагает простейший механизм направленного (благодаря обращениям к значениям J) перебора значений всех элементов матрицы \mathbf{K} ; при этом скорость сходимости к наилучшему решению существенно зависит от выбора начального значения \mathbf{K} и, в конечном итоге, от того, насколько успешно реализуется свойство асимптотической устойчивости решения системы (4).

Вторая экстремальная задача — $\mathbf{K} = \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$, $\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{C}\mathbf{D} + \mathbf{D}\mathbf{C}^T - \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} J$, где \mathbf{D}_0 , \mathbf{Q} , \mathbf{R} — положительно

определенные матрицы; обращение к ней, как уже указывалось нами в работе [1], гарантирует асимптотическую устойчивость алгоритма (4), но при этом, что немаловажно, при надлежащем выборе матриц \mathbf{Q} и \mathbf{R} позволяет существенно сократить число настраиваемых параметров; заметим, что механизм настройки матрицы \mathbf{K} включает матрицу \mathbf{C} , т. е. в неявном виде априорную информацию о характере эволюции вектора δx , или, что то же самое по сути, о ядре Φ , и таким образом, этот механизм можно назвать "ядерным" в отличие от "безъядерного" предыдущего. Обращаясь к сообществам биологических нейронов, можно предположить, что подобный механизм отклика на внешнюю по отношению к этому сообществу информацию существует и у них и, по-видимому, только у высокоорганизованных организмов с высокоорганизованной центральной нервной системой (ЦНС). Третья экстремальная задача, численная верификация которой будет предложена в следующем разделе при решении рассматриваемой здесь задачи аналитического конструирования интегрированной информационно-навигационной системы, имеет вид: $\mathbf{K} = \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$, $\dot{\mathbf{D}} = -\mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} J$, включает, очевидно, безъядерный

(строго говоря, с "чужим" ядром $\Phi = \mathbf{E}$, \mathbf{E} — единичная матрица) механизм настройки синаптических коэффициентов и имеет своим прообразом более высокий уровень самоорганизации биологических

нейронов по сравнению с первым случаем, но уступает в этом второму.

Если выбрать матрицы \mathbf{Q} и \mathbf{R} в виде $\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2)$ и $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_4^2, \sigma_4^2, \sigma_4^2)$, то рассматриваемая далее экстремальная задача (из трех последних) будет решаться в пространстве только четырех параметров ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$) при числе синаптических коэффициентов, равном двадцати семи.

Как и в работе [1], для решения задачи реализуется мультисистема из $3^4 = 81$ конкурирующих между собой (что будет видно ниже при описании работы мультисистемы) параллельных вычислительных систем. И здесь, опять обращаясь к прообразам, можно допустить, что подобная мультисистемная конкурсная (по сути, с резервированием функций) организация может встречаться и у популяций биологических нейронов, что способствует повышению функциональной надежности ЦНС в целом.

Работа каждой из 81 системы — алгоритмов динамического обращения — выполняется при одинаковых для всех стартовых на шаге решения условиях, но при разных значениях параметров \mathbf{Q} и \mathbf{R} . Победившая в таком соревновательном на шаге процессе (или, образно говоря, на этапе конкурса) признается система с наименьшим значением J , а значения ее переменных x^* и \mathbf{D} принимаются в качестве стартовых на следующем шаге решения для всех систем мультисистемы; следующий набор значений параметров \mathbf{Q} и \mathbf{R} формируется около (как центра) значений параметров \mathbf{Q} и \mathbf{R} победившей системы. Например, если $\tilde{\sigma}_1$ — значение параметра σ_1 системы-победителя, то новый набор значений параметра есть $\{\tilde{\sigma}_1(1 - \alpha), \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_1(1 + \alpha)\}$; $0 < \alpha < 1$; аналогично назначаются новые значения параметров $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$.

Вычислительный эксперимент

Численная верификация модельных представлений, изложенных выше, выполнена на двух траекториях — при движении объекта с постоянной относительно Земли линейной скоростью $V = 100$ м/с 1) вдоль меридиана и 2) по параллели на широте 45° . При этом в обоих случаях в качестве приближенного значения вектора ω рассматривали вектор абсолютной угловой скорости вращения географически ориентированного (с осями, направленными на Восток, Север и по радиус-вектору места объекта) подвижного ортогонального координатного трехгранника, а в качестве оцениваемых компонент вектора $\delta\omega$ — синусоиды одной частоты, но с различающимися амплитудами и фазами.

Прежде всего была оценена разрешимость задачи (2), (3), т. е. возможность ее численного обращения, на вычислительных средствах с относительной точностью, равной $\varepsilon_1 = 2,2 \cdot 10^{-16}$.

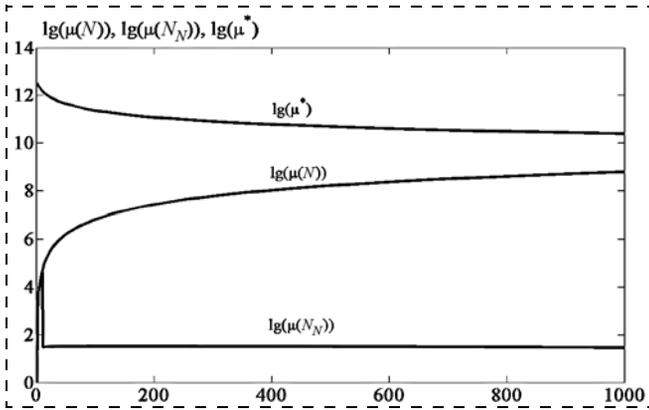


Рис. 1

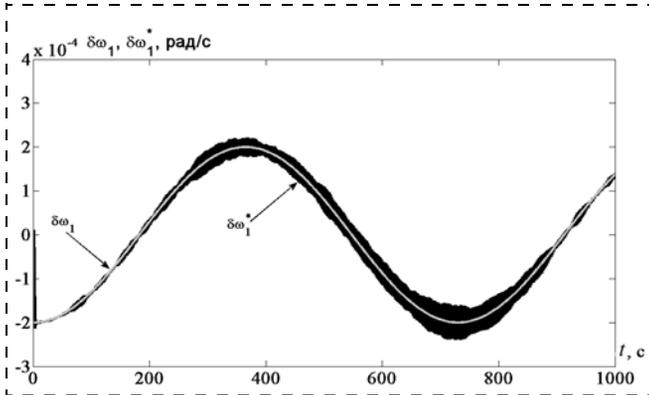


Рис. 2

На рис. 1 представлены графики эволюции (по мере накопления измерений) чисел обусловленности $\mu(N)$ и $\mu(N_N)$ соответственно для матрицы $N = (N_1 : N_2 : \dots : N_n)$, $\dim N = m \times n$ и нормированной матрицы $N_N = N \cdot \text{diag}(\|N_1\|^{-1}, \|N_2\|^{-1}, \dots, \|N_n\|^{-1})$, $\|N_i\|$ — евклидова норма i -го вектора столбца матрицы N ; здесь же на рис. 1 представлен график значений числа μ^* , рассчитываемый по формуле $\mu^* = [\varepsilon_1(\sqrt{n}(2n-3)(4m+27) + 4m+30)]^{-1}$ [5]. Как видно из рис. 1, $\mu(N) < \mu^*$ и $\mu(N_N) < \mu^*$, т. е. условия разрешимости задачи (2), (3) в выбранной вычислительной среде выполняются.

На рис. 2 в качестве репрезентативного представлен пример численного оценивания значения одной из компонент ($\delta\omega_1$) вектора $\delta\omega$. Эксперимент проводили при среднеквадратических значениях погрешностей ньютонометров $\sigma_f = 10^{-3}$ м/с² и погрешностей оценок места объекта НСС $\sigma_e = 1$ м. Как видно из рис. 2, оба графика значений $\delta\omega_1(t)$ и ее оценки $\delta\omega_1^*(t)$ достаточно слабо различимы, что можно рассматривать как свидетельство эффективности предложенного метода формирования интегрированной системы. Отдельно, но то же самое, можно сказать и об эффективности по быстрдействию нейросетевого алгоритма с безъядерным механизмом настройки синаптических коэффициентов, так как значение показателя быстрдействи-

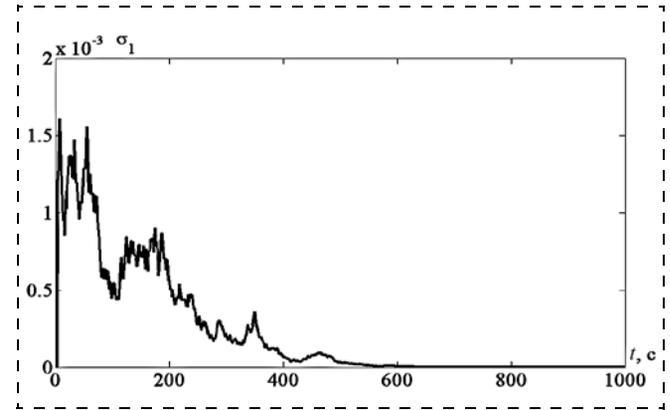


Рис. 3

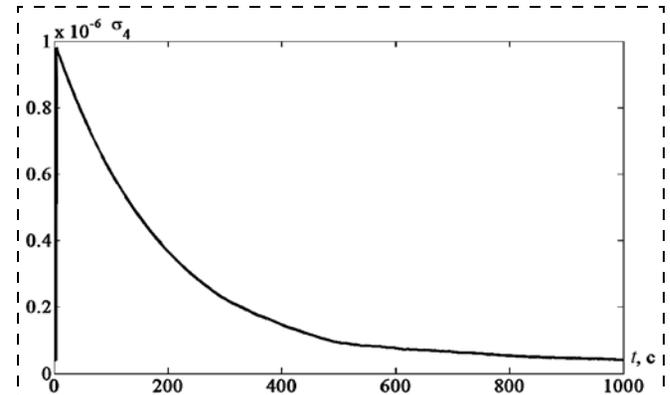


Рис. 4

вия $\tau = T_R/T_M$, где T_M — время численного моделирования реального процесса оценивания длительностью T_R , весьма высоко, а именно, $\tau > 12$.

Для полноты представлений о работе предложенной нейросети на рис. 3 и рис. 4 представлены соответственно графики эволюции параметров настройки σ_1 и σ_4 .

Заключение

Как видно из изложенного выше, полученные результаты безгироскопной оценки угловой скорости весьма эффективны и могут быть учтены при создании навигационных систем для высокоманевренных подвижных объектов.

Список литературы

1. Девятисильный А. С., Числов К. А. Нейросетевая коррекция безгироскопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 11. С. 67–70.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966.
3. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967.
4. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
5. Девятисильный А. С., Числов К. А. Модель векторной гравиметрии на базе модели интеграции двухкомпонентной инерциальной, спутниковой и астронавигационной систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 8. С. 61–63.
6. Лескова Н. Л. В стране лилипутов // В мире науки / Scientific American. 2014. № 6. С. 48–53 (Русская версия SA).

A Model of Competitive Neuromorphic Aggregation of Information in the Integrated Satellite-Inertial Navigation System

A. S. Devyatisil'nyi, devyatis@iacp.dvo.ru✉, **K. A. Chislov**, kirillche@rambler.ru,
Institute of Automation and Control Processes (IACP), Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: **Devyatisil'nyi Aleksandr S.**, Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes (IACP), Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Received on December 23, 2014

Accepted on February 05, 2015

The authors of this paper demonstrate how, with the on-board multi-position information received from a satellite navigation system and the inertial information delivered from three dimension accelerometers with orthogonal axes of sensitivity, forming a movable coordinate trihedron, for the latter one the orientation and angular velocity of the rotation in projections on its own axis can be determined. The mathematical model of the inverse problem in the "state-measurement" form is presented as 1) a dynamic group of equations of functioning of the inertial navigation system (without gyroscopes), with the state vector, which includes the coordinates, specific impulses and angular velocities of the instrumental trihedron rotation, and 2) equations for measurement of the object's location coordinates, identified with the coordinates of trihedron tops in the projections on its axis. A dynamic pseudo inversion (solution) of the problem is realized by the neural network, the model of which is based on Kalman-type algorithm in its multi-model presentation, which allows a judgment about a fair competition between the models in the progress of the state vector evaluation. The concept of "nuclear" and "nuclear-free" setting mechanisms of the neural network synaptic coefficients is introduced. Hypothesizes about a possibility of broadcasting of the characteristics, used in the description of an artificial neural network, are introduced in presentations concerning organization and functioning of the populations of the biological ("live") neurons.

The results of the computational experiments are presented.

Keywords: angular velocity, accelerometer, satellite navigation system, neuromorphism, inverse problem, algorithm of solution

For citation:

Devyatisil'nyi A. S., Chislov K. A. A Model of Competitive Neuromorphic Aggregation of Information in the Integrated Satellite-Inertial Navigation System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 716–720.

DOI: 10.17587/mau.16.716-720

References

1. **Devyatisil'nyj A. S., Chislov K. A.** *Nejrosetevaja korekcija bez-gيروسкопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации* (Neural Network Correction of the Inertial Navigation System without Gyroscopes by Satellite Navigation Information), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 11, pp. 67–70 (in Russian).

2. **Andreev V. D.** *Teorija inercial'noj navigacii. Avtonomnye sistemy* (Theory of inertial navigation. Autonomous systems.), Moscow, Nauka, 1966 (in Russian).

3. **Andreev V. D.** *Teorija inercial'noj navigacii. Korrektiruemye sistemy* (Theory of inertial navigation. Correctable system.), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).

4. **Kalman R., Falb P., Arbib M.** *Očerki po matematicheskoj teorii system* (Essays on mathematical systems theory), Moscow, Mir, 1971.

5. **Devyatisil'nyj A. S., Chislov K. A.** *Model' vektornoj gravimetrii na hazy modeli integracii dvuhkomponentnoj inercial'noj, sputnikovoj i astronavigacionnoj system* (The Model Vector Gravimetry on the Base of Two-Component Inertial, Satellite and Astronavigation Systems) *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2012, no. 8, pp. 61–63 (in Russian).

6. **Leskova N. L.** *V strane liliputov / V mire nauki* (In Lilliput / In the world of science), *Scientific American* (Russian version), 2014, no. 6, pp. 48–53 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 30.07.2015. Подписано в печать 15.09.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1015. 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"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.