

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ  
ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА  
НА БАЗЕ ПРОЦЕДУРЫ  
ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ И СМЕШИВАНИЯ РЕГРЕССОРА**

А. И. Глущенко\*, К. А. Ласточкин

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия*  
*\*aiglush@ipu.ru*

**Аннотация.** Представлено решение задачи оценивания параметров динамической модели глубины погружения необитаемого подводного аппарата. Для решения задачи предложен новый закон идентификации, основанный на процедуре динамического расширения и смешивания регрессора и алгоритме усреднения оценок неизвестных параметров. Полученная модель с идентифицированными параметрами с достаточной точностью аппроксимирует динамику глубины погружения реального аппарата и подходит для дальнейшего расчета на ее основе робастных типовых регуляторов.

**Ключевые слова:** идентификация, динамическое расширение регрессора, усреднение оценок, необитаемый подводный аппарат, возбуждение регрессора, управление

**Благодарности:** работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (проект МД-1787.2022.4).

**Ссылка для цитирования:** Глущенко А. И., Ласточкин К. А. Идентификация параметров модели глубины погружения подводного аппарата на базе процедуры динамического расширения и смешивания регрессора // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 3. С. 241—250. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-241-250.

**PARAMETERS IDENTIFICATION  
FOR UNDERWATER VEHICLE DIVING DEPTH MODEL  
BASED ON THE REGRESSOR DYNAMIC EXPANSION  
AND MIXING PROCEDURE**

A. I. Glushchenko\*, K. A. Lastochkin

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, Moscow, Russia*  
*\*aiglush@ipu.ru*

**Abstract.** A solution to the problem of estimating the parameters of a dynamic model of the diving depth of an uninhabited underwater vehicle is presented. To solve the problem, a new identification law is proposed, based on the procedure of dynamic expansion and mixing of the regressor and an algorithm for averaging estimates of unknown parameters. The resulting model with identified parameters approximates the dynamics of the immersion depth of a real apparatus with sufficient accuracy and is suitable for further calculation of robust standard controllers based on it.

**Keywords:** identification, dynamic regressor extension, estimate averaging, unmanned underwater vehicle, regressor excitation, control

**Acknowledgements:** the work was carried out with partial financial support from the Grant Council of the President of the Russian Federation (project MD-1787.2022.4).

**For citation:** Glushchenko A. I., Lastochkin K. A. Parameters identification for underwater vehicle diving depth model based on the regressor dynamic expansion and mixing procedure. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 3. P. 241—250 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-241-250.

**Введение.** К сожалению, консерватизм специалистов в области прикладной теории автоматического управления затрудняет процесс интеграции современных и эффективных алгоритмов адаптивного и нелинейного управления в реальные системы регулирования.

В таких условиях при проектировании систем управления для новых даже сильно нелинейных и нестационарных объектов приходится довольствоваться недостаточно эффективными классическими законами управления (ПИ-, ПИД-, в лучшем случае — многостепенной ПИД) и выбирать их параметры устоявшимися эвристическими и полуэвристическими методами [1—5]. Однако расчет параметров даже таких простых регуляторов по заданным показателям качества переходных процессов часто оказывается невозможен без знания хотя бы приближенной линейной модели системы, что приводит к необходимости решения задачи параметрической идентификации.

На практике для этого обычно применяют методы идентификации параметров частотной передаточной функции системы [6, 7], в соответствии с которыми для получения приближенной линейной модели системы выполняется аппроксимация полученных экспериментально частотных характеристик, снятых путем многократного воздействия на вход системы с помощью гармонических тестовых сигналов с различными частотами. Но многократная подача на реальную систему тестовых воздействий может быть недопустима, особенно для неустойчивых и существенно нелинейных систем, а кроме того, для сильно инерционных систем снятие даже одной частотной характеристики может занимать до суток, что неприемлемо и кратно увеличивает затраты времени на проектирование системы управления.

С другой стороны, современные методы параметрической идентификации динамических систем во временной области [8, 9] не требуют многократных и продолжительных экспериментов, как и подачи на вход системы различных тестовых воздействий. Задача решается по результатам всего одного эксперимента с тестовым сигналом с большим числом частот (для линейной системы  $n$ -го порядка необходимо и достаточно иметь  $n$  частот в испытательном сигнале). Более того, современные алгоритмы идентификации с ослабленными условиями параметрической сходимости [8—11] часто вообще не требуют внедрения тестовых сигналов, а позволяют определять точные значения параметров системы на ее естественных траекториях или же в процессе обработки ступенчатого испытательного/задающего воздействия. Другими значительными преимуществами методов идентификации во временной области являются: 1) применимость данных алгоритмов идентификации для оценивания параметров нелинейных динамических систем [12]; 2) возможность использования алгоритмов идентификации в автономном и автоматическом режиме [9], что позволяет строить непрямые адаптивные системы управления. В то время как классические методы частотной идентификации [6, 7], к сожалению, позволяют восстанавливать параметры только линейной аппроксимации нелинейной системы и являются офлайн-алгоритмами, т.е. требуют наличия человека для обработки экспериментальных данных.

Настоящая статья имеет две основные цели. Первая — продемонстрировать эффективность современных методов параметрической идентификации в применении к решению прикладных задач проектирования систем управления. Вторая и основная задача — идентификация параметров математической модели глубины погружения необитаемого подводного аппарата (НПА) „Водяной“ конструкторской разработки Института проблем управления РАН (Москва) [13].

**Постановка задачи.** Для решения задачи идентификации параметров математической модели глубины погружения НПА „Водяной“ (рис. 1) данная модель в инерциальной системе координат может быть представлена в следующем виде [14]:

$$\ddot{z}(t) = \frac{1}{m} [u_z(t) + f_b(t)], \quad (1)$$

где  $z(t)$  — глубина,  $u_z(t)$  — управляющее воздействие,  $f_b(t)$  — сила, возникающая в результате действия гравитации, выталкивающей силы и возмущений,  $m$  — масса аппарата; сигналы  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$  и  $u_z(t)$  считаются доступными для измерения.



Рис. 1

Следуя классическим методам линейной теории автоматического управления, примем следующее допущение.

Допущение. Система (1) с достаточной точностью может быть описана линейной динамической моделью 2-го порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B(u_z(t) + \delta(t)), \quad x(t_0) = x_0; \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_3 \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — неизвестные параметры,  $\delta(t)$  — ограниченная ошибка аппроксимации возмущения  $f_b(t)$  слагаемым  $\theta_3^{-1}(\theta_1 z(t) + \theta_2 \dot{z}(t))$ ,  $x(t) \in R^2$  — доступные для измерения координаты состояния.

Требуется определить функцию  $w: R^2 \times R \mapsto R^3$ , такую что алгоритм идентификации

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = w(x, u_z) \quad (3)$$

гарантирует выполнение предельного равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{\theta}(t) - \theta\| = 0, \quad (4)$$

где  $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T$  — обобщенный вектор неизвестных параметров.

**Метод решения.** Для получения алгоритма идентификации параметров системы (2) на базе процедуры динамического расширения и смешивания регрессора выполним параметризацию скалярных регрессионных уравнений относительно  $\theta_i$ .

**Лемма.** Параметр  $\theta_i$  удовлетворяет линейному регрессионному уравнению

$$\mathcal{Y}_i(t) = \Delta(t)\theta_i + \mathcal{W}_i(t), \quad i \in \overline{1, 3}, \quad (5)$$

$$\mathcal{Y}(t) = [\mathcal{Y}_1(t) \quad \mathcal{Y}_2(t) \quad \mathcal{Y}_3(t)]^T := \text{adj}\{\Phi(t)\}Y(t), \quad \Delta(t) := \det\{\Phi(t)\};$$

$$\mathcal{W}(t) = [\mathcal{W}_1(t) \quad \mathcal{W}_2(t) \quad \mathcal{W}_3(t)]^T := \text{adj}\{\Phi(t)\}W(t),$$

где

$$\begin{aligned} \dot{Y}(t) &= -LY(t) + \varphi(t)y(t), \quad Y(t_0) = 0_3; \\ \dot{\Phi}(t) &= -I\Phi(t) + \varphi(t)\varphi^T(t), \quad \Phi(t_0) = 0_{3 \times 3}; \\ \dot{W}(t) &= -IW(t) + \varphi(t)w(t), \quad W(t_0) = 0_{3 \times 3}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$y(t) = \frac{s}{s+q}x_2(t); \quad \varphi^T(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+q}[x^T(t)] & \frac{1}{s+q}[u(t)] \end{bmatrix}; \quad w(t) = \frac{1}{s+q}[\delta(t)] + \varepsilon(t), \quad (7)$$

$l > 0, q > 0$  — параметры фильтров,  $s = \frac{d}{dt}$  — оператор дифференцирования,  $\varepsilon(t)$  — возмущение, вызванное ненулевыми начальными условиями системы.

**Доказательство.** Представим второе уравнение системы (2) в операторной форме и умножим результат на  $\frac{1}{s+q}$ :

$$sx_2(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & u(t) \end{bmatrix} \theta + \theta_3 \delta(t),$$

$$\frac{s}{s+q} x_2(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s+q} [x^T(t)] & \frac{1}{s+q} [u(t)] \end{bmatrix} \theta + \theta_3 \frac{1}{s+q} [\delta(t)].$$
(8)

Учитывая ненулевые начальные условия, на основе (8) и определений (7) имеем

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta + w(t). \quad (9)$$

В силу  $\theta = \text{const}$ , пропустив сигнал  $y(t)$  через соответствующий фильтр из (6), получим

$$Y(t) = \Phi(t) \theta + W(t). \quad (10)$$

Умножая (10) на  $\text{adj}\{\Phi(t)\}$  и учитывая  $\text{adj}\{\Phi(t)\} \Phi(t) = \det\{\Phi(t)\} I_3$ , имеем (5). ■

Заметим, что сигналы  $\mathcal{Y}_i(t)$  и  $\Delta(t)$  могут быть вычислены с использованием доступных для измерения величин  $u_z(t)$  и  $x(t)$ . Используя результаты [15], по регрессионному уравнению (5) можно построить закон идентификации, гарантирующий выполнение цели (4) при удовлетворении возмущения условиям усреднения.

**Теорема.** Пусть функции  $\mathcal{W}_i(t)$ ,  $i = 1, 3$ , удовлетворяют условиям усреднения:

$$\mathbf{Y}_1: |\mathcal{W}_i(t)| \leq \mathcal{W}_{\max};$$

$$\mathbf{Y}_2: \left| \int_{t_0}^t \Delta^{-1}(s) \mathcal{W}_i(s) ds \right| \leq c_{\mathcal{W}} < \infty.$$

Тогда если найдется  $T \geq t_0$ , такое что  $\Delta(t) \geq \underline{\Delta} > 0$  для всех  $t \geq T$ , то закон идентификации с усреднением

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_i(t) &= -\frac{1}{F_i(t)} (\hat{\theta}_i(t) - \mathfrak{S}_i(t)), \quad \hat{\theta}_i(t_0) = \hat{\theta}_{0i}; \\ F_i(t) &= t + k_i, \quad k_i \geq 0; \quad \mathfrak{S}_i(t) = \hat{\kappa}(t) \mathcal{Y}_i(t); \\ \dot{\hat{\kappa}}(t) &= -\gamma \Delta(t) (\Delta(t) \hat{\kappa}(t) - 1) - \dot{\Delta}(t) \hat{\kappa}^2(t), \quad \hat{\kappa}(t_0) = \hat{\kappa}_0; \\ \dot{\Delta}(t) &= \text{tr}(\text{adj}\{\Phi(t)\} \dot{\Phi}(t)), \quad \Delta(t_0) = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

при выборе  $\gamma > 0$ , такого что  $\forall t \geq T$  существует число  $\eta > 0$ , удовлетворяющее неравенству

$$\gamma \Delta^3(t) + \Delta(t) \dot{\Delta}(t) \hat{\kappa}(t) + \dot{\Delta}(t) \geq \eta \Delta(t) > 0 \quad \forall t \geq T, \quad (12)$$

гарантирует следующие свойства:

$$\mathbf{C}_1) \text{ если выполнено условие } \mathbf{Y}_1, \text{ то } \lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\theta}_i(t)| \leq (|\tilde{\kappa}(t_0)| + \underline{\Delta}^{-1}) \mathcal{W}_{\max} + \bar{\Delta} |\theta_i| \cdot |\tilde{\kappa}(t_0)|,$$

где  $|\Delta(t)| \leq \bar{\Delta}$ ,  $\tilde{\kappa}(t) = \hat{\kappa}(t) - \Delta^{-1}(t)$ ;

$$\mathbf{C}_2) \text{ если для } i = \overline{1, 3} \text{ выполнены условия } \mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2, \text{ то существует предел (4).}$$

Доказательство теоремы приведено в [15].

Таким образом, при удовлетворении условий усреднения  $\mathbf{Y}_1$ — $\mathbf{Y}_2$  для всех  $i = \overline{1, 3}$  закон идентификации (11) гарантирует достижение поставленной цели (4). Если же эти условия не выполняются хотя бы в одном уравнении (5), то закон идентификации (11) обеспечивает ограниченность нормы параметрической ошибки. Основным конкурентным преимуществом закона идентификации (11) по сравнению с законами идентификации вида (см. [8, 11])

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}}(t) &= -\Gamma \varphi(t) (\varphi^T(t) \hat{\theta}(t) - y(t)), \quad \Gamma = \Gamma^T > 0; \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= -\gamma (\Phi(t) \hat{\theta}(t) - Y(t)), \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= -\gamma \Delta(t) (\Delta(t) \hat{\theta}(t) - \mathcal{Y}(t))\end{aligned}\quad (13)$$

является асимптотическая сходимость к нулю ошибки  $\tilde{\theta}_i(t)$  при наличии в параметризации (5) возмущений  $\mathcal{W}_i(t)$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , удовлетворяющих условиям усреднения [15]. В то же время законы (13) независимо от выполнения или невыполнения условий  $\mathbf{Y}_1$ — $\mathbf{Y}_2$  гарантируют только ограниченность ошибки  $\tilde{\theta}_i(t)$ , что неприемлемо для прикладных задач.

*Замечание.* Если полный вектор состояний системы (2) недоступен для измерений, то вместо (7) сигналы  $y(t)$  и  $\varphi(t)$  возможно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned}y(t) &= \frac{s^2}{\Lambda(s)} [z(t)], \\ \varphi(t) &= \left[ \frac{-1}{\Lambda(s)} [z(t)] \quad \frac{-s}{\Lambda(s)} [z(t)] \quad \frac{1}{\Lambda(s)} [u_z(t)] \right]^T,\end{aligned}\quad (14)$$

где  $\Lambda(s)$  — приведенный гурвицев многочлен 2-го порядка.

**Основной результат.** Для применения закона идентификации (11) реальный объект управления был замкнут ПИД-законом управления, обеспечивающим выполнение условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t) - 0,25 \sin(0,3\pi t) - 0,5| \leq \epsilon,$$

где  $0,25 \sin(0,3\pi t) + 0,5$  — тестовое воздействие,  $\epsilon > 0$  — достаточно малая постоянная.

С такой замкнутой системы с дискретностью, равной  $\tau_m = 0,011$  с, были сняты временные диаграммы изменения управления  $u_z(t)$  и глубины  $z(t)$  аппарата в течение 66 с непрерывного функционирования. Далее эти данные были конвертированы в файл типа csv и импортированы в среду MatLab/Simulink. В программе Simulink собрана схема идентификации, состоящая из блоков чтения данных, снятых с аппарата, и блоков, реализующих фильтрацию (6), (7), и построен алгоритм идентификации (11) (см. рис. 2). Для корректного чтения данных дискретность Simulink-модели была принята равной  $\tau_s = 0,0001$  с.



Отсутствие значительных помех в измерениях глубины позволило вычислить сигнал  $x_2(t) = \dot{z}(t)$  прямым дифференцированием. В противном случае вместо (7) необходимо было бы использовать (14). Параметры фильтров (6), (7) и закона идентификации (11) были установлены в соответствии с выражением

$$q = 10, l = 1, \gamma = 10^6, k_i = 0 \quad \forall i \in \overline{1, 3}. \tag{15}$$

На рис. 3 приведены переходные процессы по сигналу управления и глубине реального НПА.

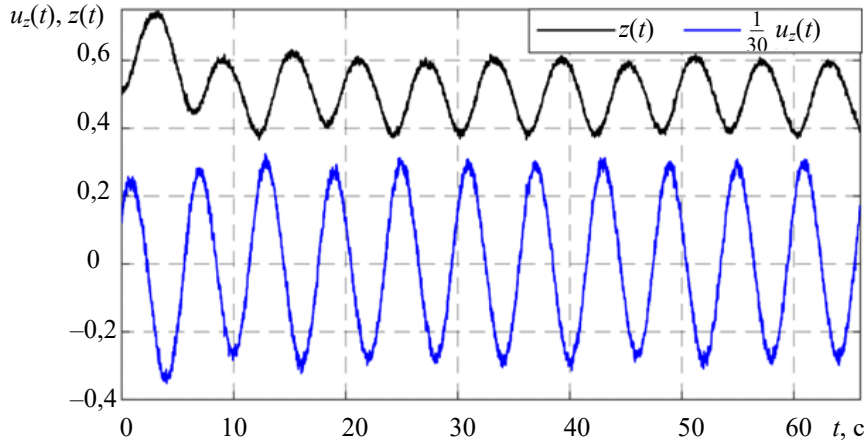


Рис. 3

Эти характеристики позволяют сделать вывод, что, во-первых, аппарат в процессе снятия реакции на тестовый сигнал, как и предписывалось, находился на глубине 0,5 м от поверхности, а во-вторых, выходная переменная и управление зашумлены.

На рис. 4 приведены переходные процессы по регрессору  $\Delta(t)$  и оценкам  $\hat{\theta}_i(t)$ , формируемым алгоритмом идентификации.

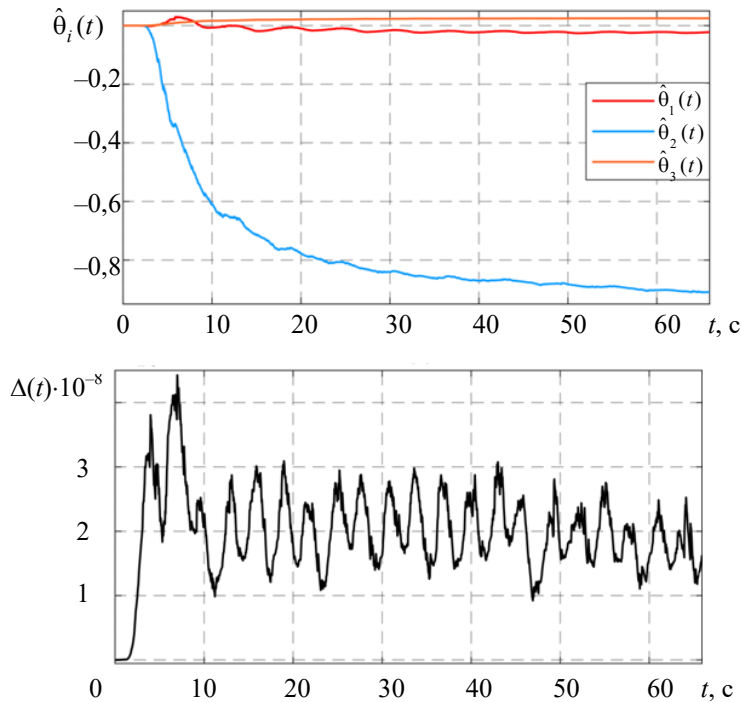


Рис. 4

Переходный процесс по регрессору  $\Delta(t)$  позволяет сделать вывод о выполнении условия  $\Delta(t) \geq \underline{\Delta} > 0$  из теоремы. Переходные процессы по  $\hat{\theta}_i(t)$  завершились, и если условия  $Y_1—Y_2$  были выполнены в соответствующих уравнениях, то можно считать, что алгоритмом идентификации(11) были определены истинные значения параметров  $\theta_i$ .

Финальные значения полученных оценок были зафиксированы, что позволило получить следующую модель системы (2):

$$z_m(t) = \frac{0,02496}{s^2 + 0,9089s + 0,02276} [u_{zm}(t)], \quad (16)$$

где  $u_{zm}(t)$  — управление моделью.

Для проверки качества идентификации модель (16) и реальный объект управления были замкнуты идентичным ПИД-регулятором:

$$u_z(t) = 27,5e(t) + 3 \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + 6\dot{e}(t); \quad (17)$$

$$u_{zm}(t) = 27,5e_m(t) + 3 \int_{t_0}^t e_m(\tau) d\tau + 6\dot{e}_m(t),$$

где  $e(t) = r(t) - z(t)$  или  $e_m(t) = r(t) - z_m(t)$  — ошибка слежения за задающим воздействием  $r(t)$  на выходе объекта или модели.

На рис. 5, а—г приведены сравнительные графики переходных процессов по глубине и управлению НПА и модели (16) при использовании (17) и различных задающих воздействиях  $r(t)$ ; на рис. 5, г используется ступенчатое задающее воздействие.

Полученные временные диаграммы показывают, что модель (16) с идентифицированными параметрами достаточно точно повторяет глубину НПА при различных задающих воздействиях (абсолютная ошибка  $|z(t) - z_m(t)|$  не превышает 15 см при амплитуде шума датчика измерения глубины в 5 см).

Различия в переходных процессах между моделью (16) и реальным НПА вызваны, прежде всего, неустранимой в использованной параметризации ошибкой аппроксимации нелинейной функции  $f_b(t)$  слагаемым  $\theta_3^{-1}(\theta_1 z(t) + \theta_2 \dot{z}(t))$ . Для ликвидации этой ошибки и повышения качества модели необходимо расширение задачи идентификации путем параметризации  $f_b(t)$  в виде  $\Phi^T(x, u_z)\theta$ , где  $\Phi(x, u_z)$  — известная функция. Однако на низких частотах управления ошибка аппроксимации переходных процессов по глубине реального НПА является приемлемой, а полученная модель — линейной, что в перспективе позволит использовать стандартные робастные методы расчета параметров регуляторов. Безусловно, агрегирование переходных процессов по  $z(t)$  и  $u_z(t)$ , представленных на рис. 5, а—г, позволит получить более точную линейную модель НПА. Однако качество аппроксимации динамики НПА моделью (16) является приемлемым, а сама модель получена на основании всего одного эксперимента (см. рис. 3), а не целой серии, что демонстрирует возможность существенного сокращения затрат времени на проектирование системы управления.

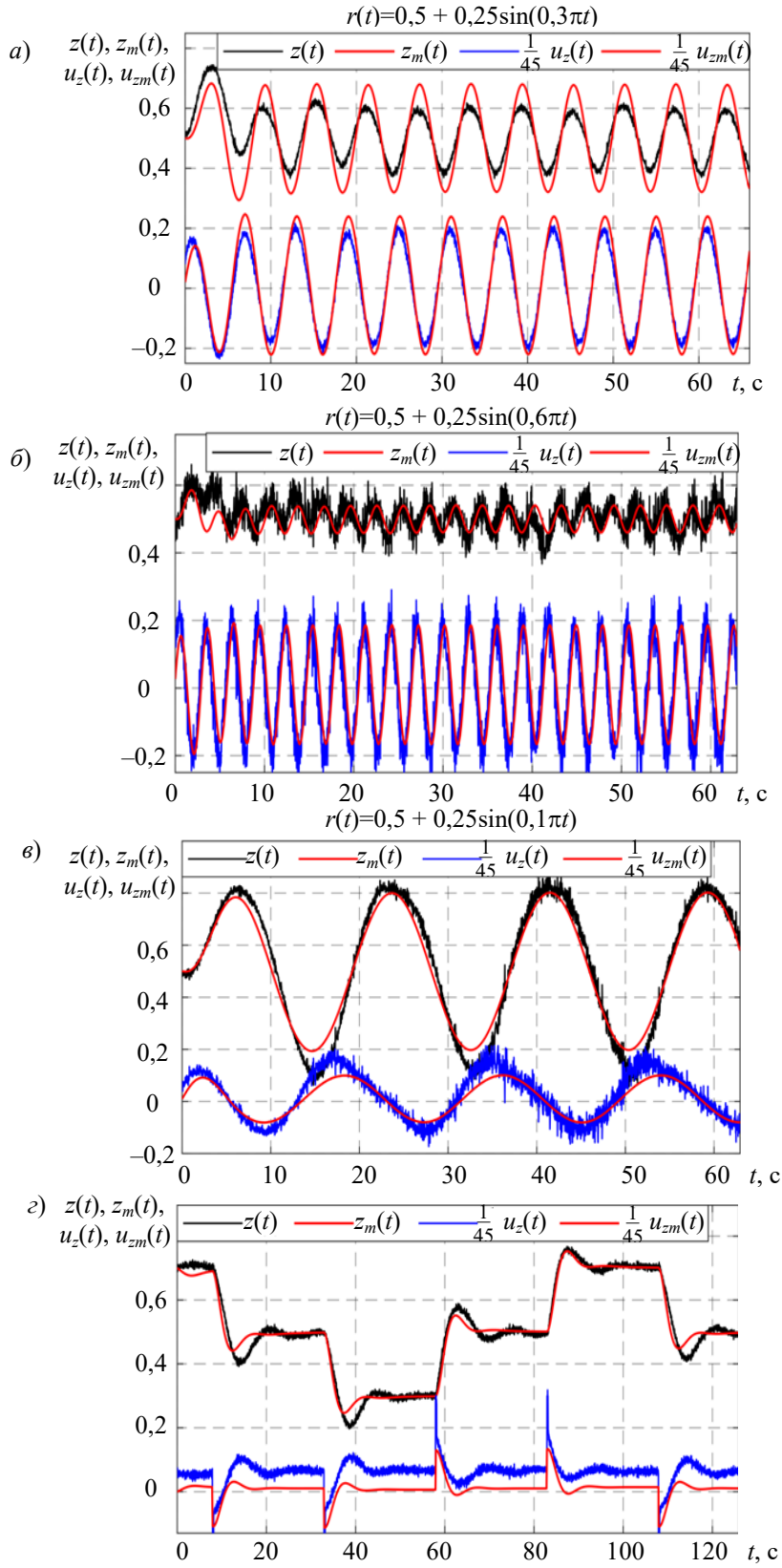


Рис. 5

В целом предложенный закон идентификации на базе процедуры динамического расширения и смешивания регрессора (5), (6) [8, 11] и алгоритма усреднения [15] может быть успешно использован на практике для определения значений параметров различных реальных динамических систем.



**Заключение.** Выполнена идентификация параметров математической модели глубины погружения необитаемого подводного аппарата с помощью нового закона, построенного на базе процедуры динамического расширения и смешивания регрессора и алгоритма усреднения формируемых оценок неизвестных параметров. Полученная модель достаточно точно аппроксимирует динамику рассматриваемого объекта и подходит для дальнейшего использования с целью синтеза робастных типовых регуляторов.

Предложенный алгоритм может быть использован для идентификации параметров различных реальных технических систем. Кроме того, по сравнению с широко применяемым на практике методом частотной идентификации предложенный алгоритм:

- позволяет существенно сократить временные затраты на решение поставленной задачи;
- не требует выполнения множества экспериментов для снятия нескольких частотных характеристик;
- может быть использован в автоматическом и онлайн режиме;
- может быть применим в задачах идентификации параметров нелинейных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *O'Dwyer A.* Handbook of PI and PID controller tuning rules. World Scientific, 2009.
2. *Astrom K. J.* PID controllers: theory, design, and tuning / The International Society of Measurement and Control. 1995.
3. *Ziegler J. G., Nichols N. B.* Optimum settings for automatic controllers // Trans. of the American Society of Mechanical Engineers. 1942. Vol. 64, N 8. P. 759—765. DOI: 10.1115/1.4019264.
4. *Яковис Л. М.* Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6. С. 51—56.
5. *Ротач В. Я.* Расчет настройки промышленных систем регулирования. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. 344 с.
6. *Рабкин Г. Л., Митрофанов В. А., Штеренберг Ю. О.* Об определении численных значений коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем по экспериментальным частотным характеристикам // Автоматика и телемеханика. 1955. Т. 16, № 5. С. 488—494.
7. *Pintelon R., Guillaume P., Rolain Y., Schoukens J., Van Hamme H.* Parametric identification of transfer functions in the frequency domain—a survey // IEEE Trans. on Automatic Control. 1994. Vol. 39, N 11. P. 2245—2260. DOI: 10.1109/9.333769.
8. *Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D.* On modified parameter estimators for identification and adaptive control. A unified framework and some new schemes // Annual Rev. in Control. 2020. Vol. 50. P. 278—293. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.06.002.
9. *Guo K., Pan Y.* Composite adaptation and learning for robot control: A survey // Annual Rev. in Control. 2023. Vol. 55. P. 279—290. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2022.12.001.
10. *Wang L., Ortega R., Bobtsov A., Romero J. G., Yi B.* Identifiability Implies Robust, Globally Exponentially Convergent On-line Parameter Estimation // Intern. Journal of Control. 2023. P. 1—16. DOI: 10.1080/00207179.2023.2246595.
11. *Gerasimov D. N., Nikiforov V. O.* On key properties of the Lion's and Kreisselmeier's adaptation algorithms // Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2022. Vol. 36, N 6. P. 1285—1304. DOI: 10.1002/acs.3311.
12. *Ortega R., Gromov V., Nuño E., Pyrkin A., Romero J. G.* Parameter estimation of nonlinearly parameterized regressions without overparameterization: application to adaptive control // Automatica. 2021. Vol. 127. P. 109544. DOI: 10.1016/j.automatica.2021.109544.
13. *Abdulov A., Abramnikov A.* Extra Steering for ROV Control System by Tracking the Gamepad Orientation // Proc. of the Intern. Russian Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 2021. P. 1041—1045. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537456.
14. *Fossen T. I.* Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley and Sons, 2011.

15. Glushchenko A., Lastochkin K. Exact asymptotic estimation of unknown parameters of regression equations with additive perturbations // Preprint arxiv.org 2310.14073. P. 1—6. <https://arxiv.org/abs/2310.14073>.

#### Сведения об авторах

- Антон Игоревич Глущенко** — д-р техн. наук, доцент; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, лаборатория № 7 адаптивных и робастных систем им. Я. З. Цыпкина; вед. научный сотрудник; E-mail: aiglush@ipu.ru
- Константин Андреевич Ласточкин** — Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, лаборатория № 7 адаптивных и робастных систем им. Я. З. Цыпкина; мл. научный сотрудник; E-mail: lastconst@ipu.ru

Поступила в редакцию 31.10.2023; одобрена после рецензирования 04.12.2023; принята к публикации 14.01.2024.

#### REFERENCES

- O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, World Scientific, 2009.
- Astrom K.J. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, The International Society of Measurement and Control, 1995.
- Ziegler J.G., Nichols N.B. *Transactions of the American society of mechanical engineers*, 1942, no. 8(64), pp. 759–765, DOI: 10.1115/1.4019264.
- Yakovis L.M. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2007, no. 6, pp. 51–56, EDN: IBKZTV. (in Russ.)
- Rotach V.Ya. *Raschet nastroyki promyshlennykh sistem regulirovaniya* (Calculation of Settings for Industrial Control Systems), Moscow, Leningrad, 1961, 344 p. (in Russ.)
- Rabkin G.L., Mitrofanov V.A., Shterenberg Yu.O. *Automation and Remote Control*, 1955, no. 5(16), pp. 488–494. (in Russ.)
- Pintelon R., Guillaume P., Rolain Y., Schoukens J., Van Hamme H. *IEEE Transactions on automatic control*, 1994, no. 11(39), pp. 2245–2260, DOI: 10.1109/9.333769.
- Ortega R., Nikiforov V., Gerasimov D. *Annual Reviews in Control*, 2020, vol. 50, pp. 278–293, DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.06.002.
- Guo K., Pan Y. *Annual Reviews in Control*, 2023, vol. 55, pp. 279–290, DOI: 10.1016/j.arcontrol.2022.12.001.
- Wang L., Ortega R., Bobtsov A., Romero J. G., Yi B. *International Journal of Control*, 2023, pp. 1–16, DOI: 10.1080/00207179.2023.2246595.
- Gerasimov D.N., Nikiforov V.O. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2022, no. 6(36), pp. 1285–1304, DOI: 10.1002/acs.3311.
- Ortega R., Gromov V., Nuño E., Pyrkin A., Romero J.G. *Automatica*, 2021, vol. 127, p. 109544, DOI: 10.1016/j.automatica.2021.109544.
- Abdulov A., Abramnikov A. *Proceedings of 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, IEEE, 2021, pp. 1041–1045, DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537456.
- Fossen T.I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley and Sons, 2011.
- Glushchenko A., Lastochkin K. *Preprint arxiv.org 2310.14073*, pp.1–6, <https://arxiv.org/abs/2310.14073>.

#### Data on authors

- Anton I. Glushchenko** — Dr. Sci., Associate Professor; V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, Ya. Z. Tsypkin Laboratory #7 of Adaptive and Robust Systems; Leading Researcher; E-mail: aiglush@ipu.ru
- Konstantin A. Lastochkin** — V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, Ya. Z. Tsypkin Laboratory #7 of Adaptive and Robust Systems; Junior Researcher; E-mail: lastconst@ipu.ru

Received 31.10.2023; approved after reviewing 04.12.2023; accepted for publication 14.01.2024.