

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-418-425

УДК 681.51

Математическое моделирование и идентификация параметров модели надводного судна

Хак Тунг Нгуен¹, Сергей Михайлович Власов²,
 Александра Викторовна Скобелева³✉

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6430-1927>

² smvlasov@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8345-7553>

³ skala.job@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0002-1504-5856>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены задачи моделирования и идентификации параметров моделей надводных судов. Предлагаемый метод идентификации применен к модифицированной модели Номото второго порядка для управления судном. **Метод.** Алгоритм идентификации основан на методе расширения и смешивания динамического регрессора (DREM, Dynamic Regressor Extension and Mixing). Метод DREM выполняется за два этапа. На первом этапе с использованием параметризации получена регрессионная модель, в которой регрессор и регрессия зависят от измеряемых сигналов: продольной, поперечной и угловой скоростей, угла поворота пера руля. На втором этапе новая регрессионная модель получена с использованием линейных стабильных фильтров и задержек. Оценка параметров выполнена стандартным методом градиентного спуска. **Основные результаты.** Рассмотрен новый алгоритм идентификации параметров модели надводного судна. Выполнен анализ возможностей предложенного метода оценивания с использованием компьютерных экспериментов. Эксперименты показали преимущество метода: при использовании метода градиентного спуска время переходного процесса для оценки параметров сигнала намного больше, чем при использовании метода DREM. В случае применения метода DREM отсутствует перерегулирование. **Практическая значимость.** Результаты работы могут служить основой для методов, алгоритмов и программного обеспечения проектирования судовых автоматизированных навигационных комплексов, систем управления другими видами транспорта. Это подтверждается результатами моделирования.

Ключевые слова

надводное судно, идентификация, Номото, DREM, метод градиентного спуска, регрессор

Ссылка для цитирования: Нгуен Хак Тунг, Власов С.М., Скобелева А.В. Математическое моделирование и идентификация параметров модели надводного судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 418–425. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-418-425

Mathematical modeling and identification of surface vessel model parameters

Khac Tung Nguyen¹, Sergey M. Vlasov², Aleksandra V. Skobeleva³✉

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6430-1927>

² smvlasov@itmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8345-7553>

³ skala.job@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0002-1504-5856>

Abstract

The paper considers the problems of modeling and identification of parameters for models of surface ships. The proposed identification method is applied to a modified second order Nomoto model for ship steering. The identification algorithm is based on the Dynamic Regressor Extension and Mixing Method (DREM) that is performed in two steps. At the first stage parameterization is used for a regression model, in which the regressor and regression depend on the

measured signals, namely, longitudinal, lateral and angular velocities and steering angle. At the second stage a new regression model is built using linear stable filters and delays. Finally, the parameters are estimated by the standard gradient descent method. The paper proposes a new algorithm which identifies the parameters for models of surface ships. The authors analyzed the prospects of the proposed estimating method by computer experiments. Experiments have shown the advantage of the method: when using the gradient descent method, the transient time spent to estimate the signal parameters is much longer than using the DREM method. At the same time, in the case of using the DREM method, there is no overshoot. The results of the work can serve as a basis for methods, algorithms and software for designing ship automated navigation systems and control systems for other modes of transport. This is confirmed by the simulation results.

Keywords

surface ship, identification, Nomoto model, DREM, gradient descent method, regressor

For citation: Nguyen Khac Tung, Vlasov S.M., Skobeleva A.V. Mathematical modeling and identification of surface vessel model parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 418–425 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-418-425

Введение

Работа посвящена вопросам построения математической модели, оценки параметров и решения задачи управления автоматическим движением надводных судов.

Проблемы динамического управления движением судов важны в науке, найдено большое количество экспериментов, статей и работ, посвященных вопросам управления надводных судов. В работах [1, 2] предложен синтез адаптивного управления по выходу роботизированного судна с параметрическими и функциональными неопределенностями. В [3–5] разработаны алгоритмы управления выходом динамического позиционирования в условиях внешних возмущений — одной из наиболее интересных и актуальных прикладных задач теории управления.

Математическая модель морского судна сложна из-за нелинейного характера гидродинамических сил и моментов, связанных с динамикой судна, структурной и параметрической неопределенностями, наличием внешних возмущений. Кроме того, со временем меняются некоторые параметры, например, те, что связаны с загрузкой судна. Методы системной идентификации играют важную роль в моделировании маневренного движения корабля. Обычно они основаны на тестах модели в автономном режиме или полномасштабных испытаниях.

В надводной и подводной морской робототехнике используемые системы и транспортные средства могут иметь высокую степень сложности. Меняющиеся условия окружающей среды и сложность инфраструктуры, необходимой для проведения экспериментальных испытаний, требуют математических моделей для точного моделирования. Системная идентификация морских транспортных средств началась в 70-х годах прошлого века с работы [6], где был представлен адаптивный автопилот с эталонной моделью, и с работы [7], в которой были использованы методы параметрической линейной идентификации для оценивания динамики судна с помощью метода максимального правдоподобия.

В [8] предложен метод идентификации параметров судна, движение которого описывается нелинейной моделью Номото второго порядка, с использованием метода градиентного спуска, разработанного А.Л. Фрадковым. Суть предложенной процедуры иден-

тификации заключается в минимизации целевой функции, описывающей разницу между параметрами модели и реального объекта при известном входном воздействии и измеряемыми выходными переменными. Отметим, что идентификация судна (в том числе и без активного управления) возможна во время движения, однако, при значительном возмущении, предложенный алгоритм может стать неработоспособным.

В [9] приведено описание метода, основанного на расширенном фильтре Калмана. Метод позволяет оценивать состояние линейной динамической системы на основе измерений возмущений в дискретные моменты времени. Недостатком такого подхода является низкая скорость сходимости.

Метод идентификации, предложенный в работах [10–12], основан на применении генетического алгоритма, суть которого заключается в аппроксимации функции параметров полиномом небольшого порядка. Скорость сходимости данного метода хотя и выше, чем в [9], однако остается недостаточно большой.

В [13–16] предложен подход, использующий метод наименьших квадратов. Метод основан на минимизации суммы квадратов отклонений значений функций от параметров, которые необходимо оценить. Недостатком метода является наличие существенных колебаний, нежелательных при практическом применении.

В [17] представлен подход, основанный на рекурсивной нейронной сети, который также был предложен и экспериментально оценен в [18, 19]. Данные подходы могут иметь проблемы с идентификацией системы при нелинейных условиях управления.

Модель Номото [20] — одна из самых популярных моделей для описания управления судном. Модель часто применяется исследователями, что находит отражение в современной научной литературе. Фундаментальные свойства наблюдаемости и управляемости для моделей Номото первого и второго порядков изучены в работе [21]. Подход к идентификации параметров динамики рулевого управления судна, основанный на модели первого порядка Номото, представлен в [22]. В [23] показана применимость такой модели к решению задач в практических ситуациях.

В настоящей работе изложен новый алгоритм онлайн-идентификации параметров судна с использованием метода динамического расширения и смешивания регрессора (DREM, Dynamic Regressor Extension and

Mixing). Алгоритм позволяет оценивать все параметры по отдельности, что увеличивает быстродействие и обеспечивает глобальную сходимость ошибки оценки к нулю при отсутствии возмущения.

Построение математической модели надводного судна

Известно, что, когда судно движется в море, изменения в окружающей среде могут иметь большое влияние на его характеристики. Изучать движение корабля очень сложно, потому что в динамике движения должен быть определен набор параметров. Рассмотрим математические модели динамики судна и волн.

Предлагаемые математические модели маневрирования надводных судов можно разделить на две категории: модели точечных масс и модели твердого тела. Категории динамических моделей подвергаются воздействию внешних сил (т. е. сил окружающей среды — волн, ветра и течений) и внутренних сил (силы гребного винта и руля направления) во время навигации. Также следует учитывать кинематические и динамические отношения.

В морских системах, как и во множестве инженерных областей, необходима адекватная математическая модель для моделирования и прогнозирования поведения реальной системы с максимально возможной точностью. Если разработана надежная математическая модель, и она точно предсказывает поведение реальной системы, то управляющие воздействия можно планировать и тестировать при моделировании, избегая длительных по времени и дорогостоящих практических тестов.

Надежная математическая модель судна, такая как модель Абковица [24], требует идентификации множества гидродинамических параметров. Задача идентификации для такого большого количества переменных может быть сложной и занимать много времени. Кроме того, необходимо проводить испытания для различных гидродинамических параметров, что показано в [19, 25, 26]. По этой причине используются более простые модели транспортных средств без моделирования динамических характеристик. Каждая из этих моделей воспроизводит реальное поведение кораблей с большой точностью в большинстве практических сценариев. Для рассматриваемой задачи авторы допускают постоянную продольную скорость и определяют математическую модель, которая описывает уравнения управления судном. Авторами выбрана модель Номото [19], которая является альтернативным представлением модели Дэвидсона и Шиффа [27].

Система отсчета, используемая в математической модели маневрирования судна, представлена на рис. 1. В [25] можно найти несколько кинематических и динамических моделей судов: нагона (u), маневрирования (u, v), горизонтальную модель движения (u, v, r), продольного движения (u, w, q) и бокового движения (u, p, r), которые основаны на соответствующих состояниях судна, где v — поперечная скорость, r — угловая скорость курса, w — продольная скорость по оси OZ_b , q — скорость вертикального поворота, p — скорость

горизонтального поворота. Построим математическую модель подсистемы качания и рыскания (v, r).

На рис. 1 введены следующие обозначения: $O_n X_n Y_n Z_n$ — неподвижная координатная система, связанная с землей и с судном; $O_b X_b Y_b Z_b$ — система координат, связанная с центральным моментом судна O_b , оси которой направлены по осям симметрии корпуса; X_b — продольная ось (направлена от кормы к носу); Y_b — поперечная ось (направлена на правый борт); Z_b — нормальная ось (направлена сверху вниз); K — продольная сила $O_b X_b$; M — горизонтальная сила $O_b Y_b$; N — нормальная сила $O_b Z_b$.

В рамках работы не рассматривается влияние внешних возмущений, таких как волны, ветер и течения. Предположим, что продольная скорость судна является постоянной (u_0). Динамические уравнения движения и соответствующие силы в неподвижной системе тела могут быть представлены следующим образом [28]:

$$m(\dot{v} + u_0 r + x_G \dot{r}) = Y(v, r, \delta_R, \dot{v}, \dot{r}), \tag{1}$$

$$I_Z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_0 r) = N(v, r, \delta_R, \dot{v}, \dot{r}), \tag{2}$$

$$r = \dot{\psi},$$

где m — масса судна; I_Z — присоединенный момент инерции массы судна; x_G — продольная координата центра тяжести судна; Y — компонент поперечных гидродинамических сил; N — гидродинамический момент рыскания; ψ — курс судна; δ — угол поворота пера руля; δ_R — угол поворота пера руля.

Соответствующие гидродинамические силы и моменты могут быть записаны:

$$Y(v, r, \delta_R, \dot{v}, \dot{r}) = Y_v v + Y_r r + Y_\delta \delta_R + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r},$$

$$N(v, r, \delta_R, \dot{v}, \dot{r}) = N_v v + N_r r + N_\delta \delta_R + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r}.$$

Рассмотрим уравнения движения (1), (2) для данной системы в более компактной форме:

$$\mathbf{M}_R \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{N}_R(u_0) \mathbf{v} = \mathbf{B}_R \delta_R, \tag{3}$$

где $\mathbf{v} = [v \ r]^T$ — вектор линейной и угловой скоростей; \mathbf{M}_R — матрица инерции твердого тела; \mathbf{N}_R — матрица Кориолиса; \mathbf{B}_R — вектор внешних сил и моментов.

Матрицы $\mathbf{M}_R, \mathbf{N}_R(u_0), \mathbf{B}_R$ можно записать как:

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & m - Y_{\dot{r}} \\ m x_G - N_{\dot{v}} & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix},$$

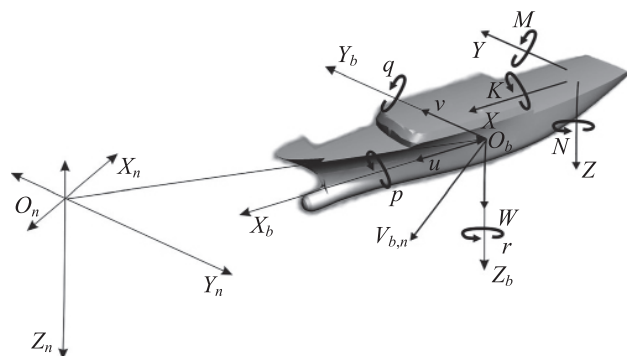


Рис. 1. Степени свободы судна
Fig. 1. Degrees of freedom of the ship

$$\mathbf{N}_R(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_G u_0 - N_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix}.$$

Линейную систему рулевого управления судна, представленную в формуле (3), можно переписать:

$$\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{N}_R(u_0) \mathbf{v} + \mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{B}_R \delta_R = \mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{B} \delta_R, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{A} = -\mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{N}_R(u_0),$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}_R^{-1} \mathbf{B}_R.$$

Матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} уравнения (4) можно представить следующим образом:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

где соответствующие коэффициенты равны:

$$a_{11} = \frac{(I_Z - N_{\dot{r}}) + (mx_G - Y_{\dot{r}})N_v}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})},$$

$$a_{12} = \frac{(I_Z - N_{\dot{r}})(mu_0 - Y_r) + (mx_G - Y_r)(mx_G u_0 - N_r)}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})},$$

$$a_{21} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_v + (mx_G - N_{\dot{v}})Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})},$$

$$a_{22} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})(mx_G u_0 - N_r) + (mx_G - N_{\dot{v}})(mu_0 - Y_r)}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})},$$

$$b_1 = \frac{(I_Z - N_{\dot{v}})Y_\delta + (Y_{\dot{r}} - mx_G)N_\delta}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})},$$

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_\delta + (N_{\dot{v}} - mx_G)Y_\delta}{(m - Y_{\dot{v}})(I_Z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{v}})(mx_G - N_{\dot{r}})}.$$

Линейная модель Номото второго порядка

Линейную модель Номото второго порядка из [27] можно переписать с учетом курсового угла судна:

$$\ddot{\psi} + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{\psi} + \frac{1}{T_1 T_2} \psi = \frac{K_R}{T_1 T_2} (T_3 \dot{\delta}_R + \delta_R), \quad (6)$$

где T_1, T_2, T_3, K_R — параметры судна, полученные из (5) следующим образом:

$$T_3 = \frac{1}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \quad K_R = \frac{a_{21} b_1 - a_{11} b_2}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}},$$

$$T_1 T_2 = \frac{1}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}, \quad T_1 + T_2 = \frac{a_{11} + a_{22}}{a_{12} a_{21} - a_{11} a_{22}}.$$

Применим преобразование Лапласа для уравнения (6):

$$\psi(s) s^3 + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \psi(s) s^2 + \frac{1}{T_1 T_2} \psi(s) s =$$

$$= \frac{K_R}{T_1 T_2} (T_3 \delta_R(s) s + \delta_R(s)), \quad (7)$$

где s — оператор Лапласа.

Запишем (7) в форме передаточной функции зависимости курса судна от угла поворота пера руля:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K_R(1 + T_3 s)}{s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} = \frac{\beta_1 s + \beta_2}{s(s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)}, \quad (8)$$

где $\beta_1 = \frac{T_3 K_R}{T_1 T_2}$; $\beta_2 = \frac{K_R}{T_1 T_2}$; $\alpha_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}$; $\alpha_2 = \frac{1}{T_1 T_2}$; $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ — неизвестные параметры модели (8).

Из (8) имеем:

$$s^3 \psi(s) = -s^2 \alpha_1 \psi - s \alpha_2 \psi + s \beta_1 \delta + \beta_2 \delta. \quad (9)$$

Введем линейный фильтр третьего порядка с характеристическим полиномом $\Lambda = \frac{\lambda^3}{(s + \lambda)^3}$ для уравнения (9) и получим:

$$\frac{\lambda^3 s^3}{(s + \lambda)^3} \psi = \frac{-s^2 \lambda^3 \alpha_1}{(s + \lambda)^3} \psi + \frac{-s^2 \lambda^3 \alpha_2}{(s + \lambda)^3} \psi +$$

$$+ \frac{s \lambda^3 \beta_1}{(s + \lambda)^3} \delta + \frac{\lambda^3 \beta_2}{(s + \lambda)^3} \delta, \quad (10)$$

где $\lambda > 0$ — настраиваемый параметр.

Уравнение (10) можно представить в регрессионной форме n -го порядка, где n — количество неизвестных параметров:

$$y_f(t) = \mathbf{m}^T(t) \boldsymbol{\theta}, \quad (11)$$

где $y_f(t) = \frac{\lambda^3 s^3}{(s + \lambda)^3} \psi$ — измеряемый сигнал; $\mathbf{m}^T(t) =$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-\lambda^3 s^2}{(s + \lambda)^3} \psi & \frac{-s \lambda^3}{(s + \lambda)^3} \psi & \frac{s \lambda^3}{(s + \lambda)^3} \delta & \frac{\lambda^3}{(s + \lambda)^3} \delta \end{bmatrix} =$$

$[m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14}]$ — матрица регрессора; $y_f: R_+ \rightarrow R$, $\mathbf{m}: R_+ \rightarrow R^4$ — известные ограниченные функции вре-

мени; $\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^4$ — вектор неизвестных параметров ($n = 4$).

Алгоритм идентификации параметров надводного судна

Предложение. Оценка параметров на основе метода градиентного спуска имеет вид:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = K \mathbf{m}(y_f - \mathbf{m}^T \hat{\boldsymbol{\theta}}),$$

где K — положительный коэффициент; $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ — оценка параметра $\boldsymbol{\theta}$.

Метод динамического расширения регрессора и смешивания (DREM)

Очевидно, что для идентификации $\theta_i(t)$ необходимо обеспечить высокое быстродействие алгоритмов их оценивания [29].

Пропустим известные элементы регрессионной модели (11) через блок запаздывания $[H(\cdot)](t) = (\cdot)(t - d_i)$, $i = 1, 2, 3, d_i \in R_+$. Тогда имеем:

$$\begin{aligned} y_f(t-d_1) &= \mathbf{m}^T(t-d_1)\theta, \\ y_f(t-d_2) &= \mathbf{m}^T(t-d_2)\theta, \\ y_f(t-d_3) &= \mathbf{m}^T(t-d_3)\theta, \end{aligned}$$

где d_1, d_2, d_3 — положительные постоянные числа.
Обозначим:

$$\mathbf{Y}_e = \mathbf{M}_e \theta, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{Y}_e = \begin{bmatrix} y_f(t) \\ y_f(t-d_1) \\ y_f(t-d_2) \\ y_f(t-d_3) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^4;$$

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} m_{11}(t) & m_{12}(t) & m_{13}(t) & m_{14}(t) \\ m_{11}(t-d_1) & m_{12}(t-d_1) & m_{13}(t-d_1) & m_{14}(t-d_1) \\ m_{11}(t-d_2) & m_{12}(t-d_2) & m_{13}(t-d_2) & m_{14}(t-d_2) \\ m_{11}(t-d_3) & m_{12}(t-d_3) & m_{13}(t-d_3) & m_{14}(t-d_3) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4};$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^4.$$

Умножив (12) на $\text{adj}\{\mathbf{M}_e\}$ алгебраическое дополнение матрицы \mathbf{M}_e , получаем:

$$Y_i = \Delta \theta_i,$$

где $\Delta = \det\{\mathbf{M}_e\} \in \mathbb{R}^1$ — определитель матрицы \mathbf{M}_e ;
 $Y = \text{adj}\{\mathbf{M}_e\} \mathbf{Y}_e, i = 1, 2, 3, 4.$

Для оценивания параметров $\theta_i(t)$ воспользуемся следующей формулой:

$$\dot{\hat{\theta}}_i = \gamma_i \Delta (Y_i - \Delta \hat{\theta}_i),$$

где $\gamma_i > 0$ — матрица коэффициентов адаптации для оценки неизвестных параметров.

Рассмотрим выражение для ошибки оценки параметров $\tilde{\theta}_i(t) = \hat{\theta}_i(t) - \theta_i, i = 1, \dots, 4.$

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = -\gamma_i \Delta^2(t) \tilde{\theta}_i.$$

Решив скалярное дифференциальное уравнение, получим:

$$\Delta(t) \notin \mathcal{L}_2 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}_i(t) = 0.$$

Математическое моделирование

Представим результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предложенного метода идентификации неизвестных параметров надводного судна. Моделирование выполнено при помощи пакета MATLAB/Simulink. Для моделирования выбраны параметры: $\alpha_1 = 3, \alpha_2 = 4, \beta_1 = 1, \beta_2 = 2,$ соответствующие $\theta_1 = 3, \theta_2 = 4, \theta_3 = 1, \theta_4 = 2, d_1 = 0,01 \text{ с}, d_2 = 0,02 \text{ с}, d_3 = 0,03 \text{ с}, \lambda = 1$ и $\delta = 5\sin 2t + 2\sin 3t + 4\sin t + 6\sin(t+1).$

Передаточная функция системы принимает вид:

$$P = \frac{s+2}{s^3+3s^2+4s}.$$

Как показано на рис. 2 и 3, оценка параметров предложенной линейной модели надводного судна ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$) достигнута, и расчетные значения успеш-

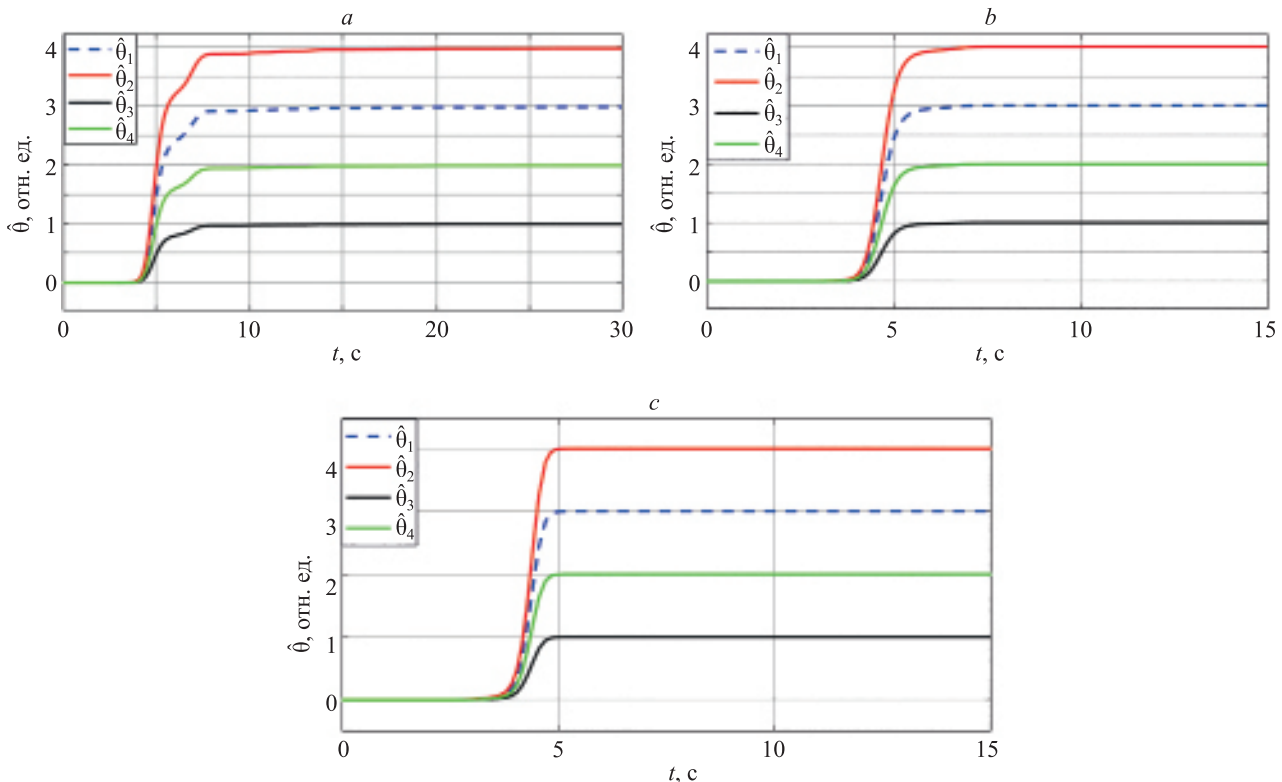


Рис. 2. Графики оценки параметра $\hat{\theta}$ методом DREM при γ равном: 2000 (а); 5000 (б); 10 000 (с)
Fig. 2. Parameter $\hat{\theta}$ estimation with $\gamma = 2000$ (a); 5000 (b); 10 000 (c) (DREM method)

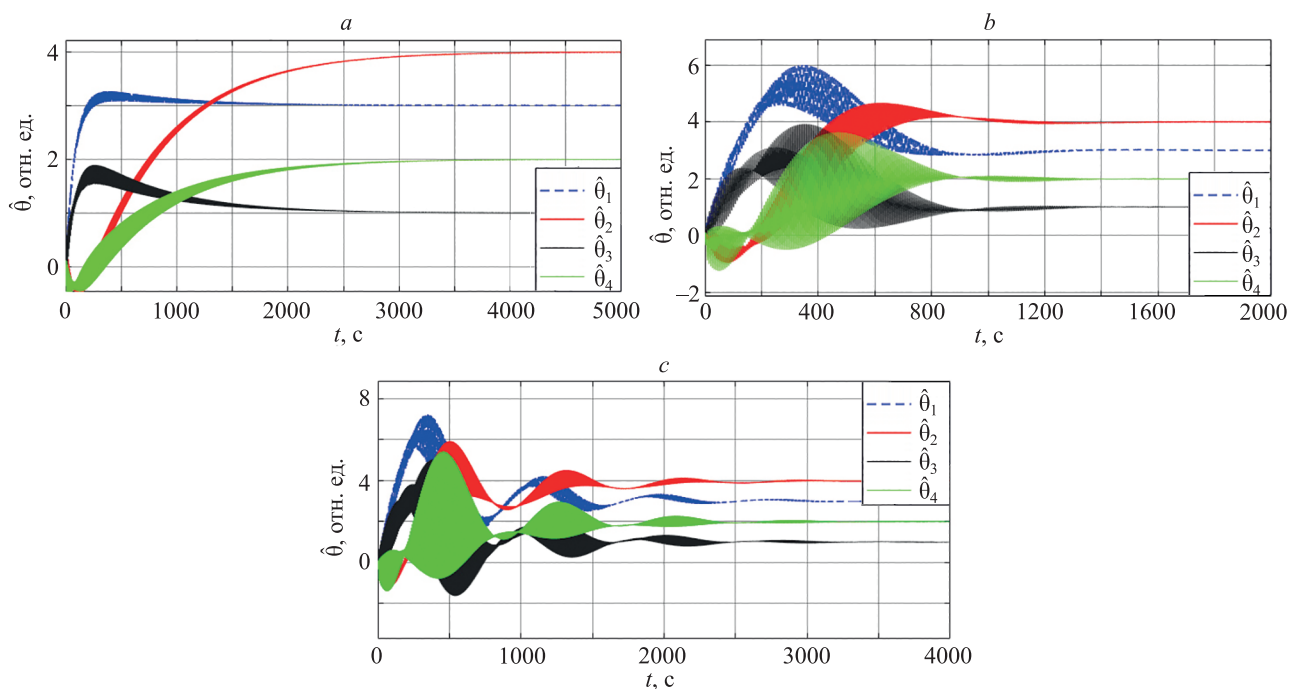


Рис. 3. Графики оценки параметра $\hat{\theta}$ методом градиентного спуска при K равном: 1 (а); 10 (б); 30 (с)

Fig. 3. Parameter $\hat{\theta}$ estimation with $K = 1$ (a); 10 (b); 30 (c) (gradient descent method)

но сходятся с фактическими. Первоначально всем параметрам были присвоены постоянные значения, далее они сводятся в фактические значения параметров, которые имеют стохастическое поведение, как предложено в настоящей работе.

По результатам моделирования на рис. 2 можно увидеть, что алгоритм идентификации, основанный на методе DREM, определяет параметры за 7 с, при этом графики гладкие и без резких выбросов, перерегулирование отсутствует. По сравнению с ним, алгоритму идентификации, основанному на методе градиентного спуска и показанному на рис. 3, понадобилось приблизительно 3700 с (при $K = 1$) и 1200 с (при $K = 10$) и 3000 с (при $K = 30$). При этом на графиках видны резкие скачки и колебания параметров. Данные результаты показывают эффективность разработанного метода.

Заключение

В работе определена модель судна второго порядка Номото. Модель судна идентифицирована путем анализа угла поворота руля, скорости наклона и качания, а также скорости рыскания, полученных в результате экспериментальных испытаний. Предложен метод расширения и смешивания динамического регрессора, применяемый к построенной регрессионной модели n -го порядка и заменой ее n независимыми моделями первого порядка. Для оценки параметров использован стандартный метод градиентного спуска. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована с помощью ряда численных расчетов.

Литература

1. Vlasov S.M., Kirsanova A.S., Dobriborsci D., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., Maltsev M.V., Semenev A.N. Output adaptive controller design for robotic vessel with parametric and functional uncertainties // Proc. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2018. P. 547–552. doi: 10.1109/MED.2018.8442738
2. Власов С.М., Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 1. С. 18–25. doi: 10.17587/mau.17.18-25
3. Власов С.М., Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 713–719. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719
4. Wang J., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Kolyubin S.A., Vlasov S.M. Output control algorithms of dynamic

References

1. Vlasov S.M., Kirsanova A.S., Dobriborsci D., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., Maltsev M.V., Semenev A.N. Output adaptive controller design for robotic vessel with parametric and functional uncertainties. *Proc. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2018, pp. 547–552. doi: 10.1109/MED.2018.8442738
2. Vlasov S.M., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Algorithms of adaptive and robust output control for a robotic prototype of a surface vessel. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 18–25. (in Russian). doi: 10.17587/mau.17.18-25
3. Vlasov S.M., Borisov O.I., Gromov V.S., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Robust system of dynamic positioning for robotized model of surface craft. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 713–719. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719
4. Wang J., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Kolyubin S.A., Vlasov S.M. Output control algorithms of dynamic positioning and disturbance rejection for robotic vessel. *IFAC-*

- positioning and disturbance rejection for robotic vessel // *IFAC-PapersOnline*. 2015. V. 48. N 11. P. 295–300. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.09.201
5. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Surov M.O., Vedyakov A.A., Feskov A.D., Vlasov S.M., Krasnov A.Y., Borisov O.I., Gromov V.S. Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2013. V. 46. N 9. P. 1867–1872. doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00287
 6. Van Amerongen J., Udink Ten Cate A.J. Model reference adaptive autopilots for ships // *Automatica*. 1975. V. 11. N 5. P. 441–449. doi: 10.1016/0005-1098(75)90020-5
 7. Åström J., Källström C.G. Identification of ship steering dynamics // *Automatica*. 1976. V. 12. N 1. P. 9–22. doi: 10.1016/0005-1098(76)90064-9
 8. Шейхот А.К. Совершенствование систем управления морскими подвижными объектами на основе идентификации и адаптации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / ФГОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского». 2008. 130 с.
 9. Ma F.C., Tóng S.H. Real time parameters identification of ship dynamic using the Extended Kalman Filter and the second order filter // *IEEE Conference on Control Applications — Proceedings*. 2003. V. 2. P. 1245–1250. doi: 10.1109/cca.2003.1223189
 10. Di Mascio A., Dubbioso G., Notaro C., Viviani M. Investigation of twin-screw naval ships maneuverability behavior // *Journal of Ship Research*. 2011. V. 55. N 4. P. 221–248. doi: 10.5957/JOSR.55.4.090031
 11. Rhee K.-P., Lee S.-Y., Sung Y.-J. Estimation of manoeuvring coefficients from PMM test by genetic algorithm // *Proc. of the International Symposium and Workshop on Force Acting on a Manoeuvring Vessel*. Val de Reuil, France. 1998. P. 77–87.
 12. Sutulo S., Guedes Soares C. An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests // *Ocean Engineering*. 2014. V. 79. P. 10–25. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.01.007
 13. Осокина Е.Б., Оськин Д.А., Дыда А.А. Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2015. № 2. С. 24–31. doi: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31
 14. Muñoz-Mansilla R., Aranda J., Diaz J.M., de la Cruz J. Parametric model identification of high-speed craft dynamics // *Ocean Engineering*. 2009. V. 36. N 12-13. P. 1025–1038. doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.05.007
 15. Алышев А.С., Ромаев Д.А., Мельников В.Г., Титов А.М., Коваленко А.Е. Идентификация параметров модели судна по углу крена на симметричных движениях // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 2. С. 347–358. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358
 16. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of manoeuvrability using recursive neural networks // *Ocean Engineering*. 2003. V. 30. N 13. P. 1669–1697. doi: 10.1016/S0029-8018(02)00147-6
 17. Chiu F.C., Chang T.L., Go J., Chou S.-K., Chen W.-C. A recursive neural networks model for ship maneuverability prediction // *Proc. of the Conference MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN'04*. 2004. V. 3. P. 1211–1218. doi: 10.1109/OCEANS.2004.1405752
 18. Rajesh G., Bhattacharyya S.K. System identification for nonlinear maneuvering of large tankers using artificial neural network // *Applied Ocean Research*. 2008. V. 30. N 4. P. 256–263. doi: 10.1016/j.apor.2008.10.003
 19. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ships // *International Shipbuilding Progress*. 1957. V. 4. N 35. P. 354–370. doi: 10.3233/ISP-1957-43504
 20. Tzeng C., Chen J. Fundamental properties of linear ship steering dynamic models // *Journal of Marine Science and Technology*. 1999. V. 7. N 2. P. 79–88.
 21. Journée J.M.J. A Simple Method for determining the manoeuvring indices K and T from zigzag trial data: Report No. 0267. 1970.
 22. Sutulo S., Guedes Soares C. Synthesis of experimental designs of maneuvering captive-model tests with a large number of factors // *Journal of Marine Science and Technology*. 2004. V. 9. N 1. P. 32–42. doi: 10.1007/s00773-003-0169-z
 23. Abkowitz M.A. Lectures on ship hydrodynamics steering and manoeuvrability: Tech. Rep. Hy-5. Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark, 1964.
 24. Abkowitz M.A. Lectures on ship hydrodynamics steering and manoeuvrability: Tech. Rep. Hy-5. Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark, 1964.
 25. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Surov M.O., Vedyakov A.A., Feskov A.D., Vlasov S.M., Krasnov A.Y., Borisov O.I., Gromov V.S. Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2013, vol. 46, no. 9, pp. 1867–1872. doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00287
 26. Van Amerongen J., Udink Ten Cate A.J. Model reference adaptive autopilots for ships. *Automatica*, 1975, vol. 11, no. 5, pp. 441–449. doi: 10.1016/0005-1098(75)90020-5
 27. Åström J., Källström C.G. Identification of ship steering dynamics. *Automatica*, 1976, vol. 12, no. 1, pp. 9–22. doi: 10.1016/0005-1098(76)90064-9
 28. Sheikhot A.K. *Improvement of Marine Vessel Control Systems on the Base of Identification and Adaptation*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. The Admiral Nevelskoy Maritime State University, 2008, 130 p. (in Russian)
 29. Ma F.C., Tóng S.H. Real time parameters identification of ship dynamic using the Extended Kalman Filter and the second order filter. *IEEE Conference on Control Applications — Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1245–1250. doi: 10.1109/cca.2003.1223189
 30. Di Mascio A., Dubbioso G., Notaro C., Viviani M. Investigation of twin-screw naval ships maneuverability behavior. *Journal of Ship Research*, 2011, vol. 55, no. 4, pp. 221–248. doi: 10.5957/JOSR.55.4.090031
 31. Rhee K.-P., Lee S.-Y., Sung Y.-J. Estimation of manoeuvring coefficients from PMM test by genetic algorithm. *Proc. of the International Symposium and Workshop on Force Acting on a Manoeuvring Vessel*, Val de Reuil, France, 1998, pp. 77–87.
 32. Sutulo S., Guedes Soares C. An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests. *Ocean Engineering*, 2014, vol. 79, pp. 10–25. doi: 10.1016/j.oceaneng.2014.01.007
 33. Osokina E., Dmitriy O., Dyda A. Simple modles based nadaptive aidentification of ship parameters. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*, 2015, no. 2, pp. 24–31. (in Russian). doi: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31
 34. Muñoz-Mansilla R., Aranda J., Diaz J.M., de la Cruz J. Parametric model identification of high-speed craft dynamics. *Ocean Engineering*, 2009, vol. 36, no. 12-13, pp. 1025–1038. doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.05.007
 35. Alyshev A.S., Romaev D.V., Melnikov V.G., Titov A.M., Kovalenko A.E. Parametric identification of ship model by symmetric motions around roll angle. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 347–358. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-347-358
 36. Moreira L., Guedes Soares C. Dynamic model of manoeuvrability using recursive neural networks. *Ocean Engineering*, 2003, vol. 30, no. 13, pp. 1669–1697. doi: 10.1016/S0029-8018(02)00147-6
 37. Chiu F.C., Chang T.L., Go J., Chou S.-K., Chen W.-C. A recursive neural networks model for ship maneuverability prediction. *Proc. of the Conference MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, 2004, vol. 3, pp. 1211–1218. doi: 10.1109/OCEANS.2004.1405752
 38. Rajesh G., Bhattacharyya S.K. System identification for nonlinear maneuvering of large tankers using artificial neural network. *Applied Ocean Research*, 2008, vol. 30, no. 4, pp. 256–263. doi: 10.1016/j.apor.2008.10.003
 39. Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. On the steering qualities of ships. *International Shipbuilding Progress*, 1957, vol. 4, no. 35, pp. 354–370. doi: 10.3233/ISP-1957-43504
 40. Tzeng C., Chen J. Fundamental properties of linear ship steering dynamic models. *Journal of Marine Science and Technology*, 1999, vol. 7, no. 2, pp. 79–88.
 41. Journée J.M.J. A Simple Method for determining the manoeuvring indices K and T from zigzag trial data. Report No. 0267. 1970.
 42. Sutulo S., Guedes Soares C. Synthesis of experimental designs of maneuvering captive-model tests with a large number of factors. *Journal of Marine Science and Technology*, 2004, vol. 9, no. 1, pp. 32–42. doi: 10.1007/s00773-003-0169-z
 43. Abkowitz M.A. *Lectures on ship hydrodynamics steering and manoeuvrability*. Tech. Rep. Hy-5. Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark, 1964.

24. Caccia M., Bruzzone G., Bono R. A practical approach to modeling and identification of small autonomous surface craft // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2008. V. 33. N 2. P. 133–145. doi: 10.1109/JOE.2008.920157
25. Fossen T.I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002. 570 p.
26. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб.и доп. Одесса: Феникс, 2007. 328 с.
27. Davidson K.S.M., Schiff L.I. Turning and course keeping qualities // *Transactions of SNAME*. 1946. V. 54. P. 189–190.
28. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing // *Proceedings of the American Control Conference*. 2016. P. 6971–6976. doi: 10.1109/ACC.2016.7526771
29. Ле Ван Туан, Бобцов А.А., Пыркин А.А. Новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 5. С. 952–955. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955
24. Caccia M., Bruzzone G., Bono R. A practical approach to modeling and identification of small autonomous surface craft. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, vol. 33, no. 2, pp. 133–145. doi: 10.1109/JOE.2008.920157
25. Fossen T.I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002, 570 p.
26. Vagushchenko L.L., Tsybal N.N. *Automatic Ship Motion Control Systems*. Odessa, Feniks, 2007, 328 p. (in Russian)
27. Davidson K.S.M., Schiff L.I. *Turning and course keeping qualities*. *Transactions of SNAME*, 1946, vol. 54, pp. 189–190.
28. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing. *Proceedings of the American Control Conference*, 2016, pp. 6971–6976. doi: 10.1109/ACC.2016.7526771
29. Le Van Tuan, Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. New algorithm of variable parameters identification for linear regression model. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 952–955. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-952-955

Авторы

Нгуен Хак Тунг — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222389082](http://orcid.org/0000-0001-6430-1927), <http://orcid.org/0000-0001-6430-1927>, nguyenkhactungvhq1994@gmail.com

Власов Сергей Михайлович — кандидат технических наук, доцент (квалификационная категория «ординарный доцент»), Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55355689600](http://orcid.org/0000-0002-8345-7553), <http://orcid.org/0000-0002-8345-7553>, smvlasov@itmo.ru

Скобелева Александра Викторовна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55355689600](http://orcid.org/0000-0002-1504-5856), <http://orcid.org/0000-0002-1504-5856>, skala.job@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.03.2021
Одобрена после рецензирования 13.04.2021
Принята к печати 01.06.2021

Authors

Khac Tung Nguyen — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222389082](http://orcid.org/0000-0001-6430-1927), <http://orcid.org/0000-0001-6430-1927>, nguyenkhactungvhq1994@gmail.com

Sergey M. Vlasov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55355689600](http://orcid.org/0000-0002-8345-7553), <http://orcid.org/0000-0002-8345-7553>, smvlasov@itmo.ru

Aleksandra V. Skobeleva — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55355689600](http://orcid.org/0000-0002-1504-5856), <http://orcid.org/0000-0002-1504-5856>, skala.job@gmail.com

Received 15.03.2021
Approved after reviewing 13.04.2021
Accepted 01.06.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»