

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-221-227
УДК 621.398.04

**А. А. Чертков,
Д. А. Загrediнов,
Ю. Б. Михайлов**

АЛГОРИТМ НАБЛЮДАТЕЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ШУМОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы состоит в улучшении качественных показателей удержания судна на курсе — повышении точности и надежности управления судном по отношению к возмущениям угла крена, угловой скорости вращения и шумов измерений, требующих компромиссных решений, связанных с выбором быстродействия системы и точности оценки вектора состояния. В реальных условиях вектор состояния не всегда доступен для измерения. Не менее сложной задачей является измерение возмущений, которые приводят к появлению дополнительных составляющих ошибки оценки переменных состояния и снижают точность управления. Для реализации системы в реальном времени оценки должны производиться с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Рассматривается метод синтеза динамического наблюдателя полной размерности (наблюдателя Калмана), отличающийся тем, что он позволяет уменьшить погрешность оценки переменных состояния судового объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, путем построения модели состояния расширенной системы «объект – среда». Оценка производится на основе алгоритмов линеаризации нелинейных моделей в пространстве состояния с использованием оптимальной фильтрации, инструментария матричной лаборатории и компьютерных технологий. Приведен пример расчета трехмерного динамического наблюдателя для оценки векторов возмущений и шумов измерений, выполненного на основе предложенного алгоритма. Результаты расчета переменных состояния и возмущений, полученные с использованием канонических форм уравнений состояния, соответствуют оптимальным (по быстродействию) переходным процессам в рассматриваемых моделях судового объекта при переводе его из начального состояния в установившееся состояние за минимальное время.

Ключевые слова: судно, модель, управление, наблюдатель, матрица, векторы выхода и состояния, модальный метод, алгоритм, синтез.

Введение

Современные системы судовождения, их технические средства характеризуются высокой размерностью и сложностью. Для обеспечения целенаправленного управления судовыми динамическими системами требуется получение достоверной информации о переменных состояния. Обеспечение заданной точности и надежности управления судном по отношению к возмущениям угла курса, угла крена или угловой скорости вращения требует компромиссных решений, связанных с выбором быстродействия системы и точности оценки вектора состояния. Вектор состояния не всегда доступен для измерений. В реальных условиях измерение вектора состояния, как правило, затруднено из-за необходимости установки датчиков в труднодоступных местах, измерения производных высоких порядков и т. д. Не менее сложной задачей является измерение возмущений, которые приводят к появлению дополнительных составляющих ошибки оценивания переменных состояния и снижают точность управления.

Для измерений переменных состояния и возмущений наряду с инструментальными могут быть предложены математические датчики информации, построенные на динамических наблюдателях и оценщиках. Уменьшить влияние возмущений можно, если выполнять, наряду с оцениванием состояния объекта, также идентификацию неизмеряемых внешних воздействий. В системах управления наиболее распространены оценки типа «фильтрация». В системах реального вре-

мени оценки целесообразно производить с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Проблеме конструирования динамических наблюдателей состояния как линейных, так и нелинейных систем уделяется большое внимание в отечественной [1] – [5] и зарубежной [6] – [8] литературе. Модели нелинейных систем управления судном, с учетом специфики воздействия на объект внешних сил и моментов, в допустимой области вариации параметров, как правило, приводятся к линейным [9].

В современной теории управления существует ряд эффективных методов решения этой проблемы [1], [2], [5], [10] – [12]. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для оценки векторов возмущений и шумов измерений на конкретном объекте имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе их синтеза [13] – [15].

Основная часть

Процедура синтеза наблюдателей для оценки возмущений и помех состоит в следующем. Сначала выбирается модель управляемого объекта с возмущениями, которые интерпретируются решениями дифференциальных уравнений с изменяющимися начальными условиями, что позволяет косвенно оценить влияние внешних воздействий. С учетом полученных оценок формируется модель внешних воздействий, которая вводится в состав расширенной динамической системы (объект, внешние возмущения), для которой строится наблюдатель. Полученные с его помощью оценки содержат как собственно оценки состояния объекта, так и оценки внешних воздействий.

В тех случаях, когда внешние воздействия моделируются рядами, состоящими из многочленов вида

$$\sum_{i=1}^N e^{\lambda_i t} P_i(t),$$

где $\lambda_i \in \Lambda$ — известные постоянные; $P_i(t)$ — многочлены с заданными коэффициентами, процедура синтеза наблюдателя значительно упрощается. Упрощение обеспечивается за счет того, что такие модели представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, для которых, например, в системе MatLab содержатся функции, допускающие объектно-ориентированное программирование операций определенного класса.

Рассмотрим алгоритм оценивания внешних воздействий для модели объекта, заданной уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + f(t); \\ y(t) = C(t)x(t) + v(t), \end{cases} \quad (1)$$

при начальных условиях $x(t_0) = x_0$, $t \geq t_0$. Здесь $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы управления и выхода; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ — матрицы линейной нестационарной системы; $f(t)$, $v(t)$ — воздействующие на объект соответственно внешние возмущения и шум (погрешность) измерений. В процессе синтеза наблюдателя выполняются измерения $u(t)$, $y(t)$, неизмеряемыми переменными являются $x(t)$, $f(t)$, $v(t)$.

Представим внешние воздействия $f(t)$, $v(t)$ в виде выходных процессов линейной системы, заданной в пространстве состояний уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c(t)x_c(t); \\ y_c(t) = C_c(t)x_c(t); \quad x_c(t_0) = x_{c0}, \quad t \geq t_0, \end{cases} \quad (2)$$

где $x_c(t)$ — вектор состояния среды размерности $(n_c \times 1)$; $y_c(t)$ — вектор выхода модели внешних возмущений размерности $(n_c + l) \times 1$. Заметим, что $y_c(t) = \text{col}\{f(t), v(t)\}$. A_c , C_c — известные матрицы. Составная матрица

$$C_c = \begin{bmatrix} C_f \\ C_v \end{bmatrix}$$

содержит подматрицу C_f размерности $(n \times n_c)$ и подматрицу C_v размерности $(l \times n_c)$, которые определяют связь $x_c(t)$ и $f(t)$ с помехами $v(t)$ в (1). В системе (2) вектор начальных состояний x_{c0} также неизвестен.

Введем расширенный («совокупный») вектор состояния системы «объект – среда»

$$\bar{x}(t) = [x(t), x_c(t)] \in R^{n \times n_c}.$$

Объединив уравнения (1) и (2), получим уравнения расширенной системы в виде:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}(t)\bar{x}(t) + \bar{B}u(t); \\ \bar{y}(t) = \bar{C}(t)\bar{x}(t); \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0, \quad t \geq t_0. \end{cases} \quad (3)$$

Матрицы состояния, управления и выхода этой системы имеют вид:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & C_f \\ 0_{n_c \times n} & A_c \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{n_c \times m} \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [C \quad C_v].$$

Видно, что для динамической системы (3) размерности $\bar{n} = n + n_c$ может быть предложен наблюдатель со следующей структурой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \bar{A}(t)\hat{x}(t) + \bar{B}(t)u(t) + L(t)(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = \bar{C}(t)\hat{x}(t); \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}_0, \quad t \geq t_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ — вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния системы «объект – среда»; $\hat{y}(t) \in R^l$ — вектор выхода наблюдателя, служащий оценкой выхода расширенной системы объекта и среды; $L(t)$ — матрица размерности $[n \times l]$ коэффициентов обратной связи по невязке между выходами расширенной системы и наблюдателя.

Для демонстрации эффективности работы алгоритма рассмотрим процедуру оценки влияния возмущения на примере упрощенной модели судна:

$$I_x \frac{d^2\theta}{dt^2} = u(t) + M(t), \quad (5)$$

где I_x — момент инерции судна относительно продольной оси; $\theta(t)$ — угол крена судна; $u(t)$, $M(t)$ — управляющий и возмущающий моменты. Если вектор $u(t)$ известен, угловая скорость крена $\omega_x(t) = \dot{\theta}(t)$ доступна для измерений, то оценке подлежит возмущающий момент $M(t)$.

Для переменной $M(t)$, являющейся линейной функцией

$$M(t) = M_0 + vt$$

с неизвестными M_0 и v , предлагается модель

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = v(t); \\ \dot{v}(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

с неизвестными начальными условиями $M(0)$ и $v(0)$, на основе которой в работе получено уравнение состояния вида (3) с матрицами \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1/I_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 1/I_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [1 \quad 0 \quad 0]. \quad (7)$$

Для системы (5) получен наблюдатель (4), в котором модель (6) имеет размерность $n = 3$. Заметим, что в наблюдателе переменные состояния $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ являются, по сути, оценками переменных $\omega_x(t)$, $M(t)$, $v(t)$ соответственно. С учетом размерности системы характеристический многочлен наблюдателя с собственными числами матрицы A_n будет иметь вид [16]:

$$\det(sI_3 - A_H) \equiv (sI_3 - A + LC) = s^3 + l_1 s^2 + \frac{l_2}{I_x} s + \frac{l_3}{I_x}.$$

Далее, используя стандартную форму представления характеристического многочлена наблюдателя с помощью полинома Баттерворта третьего порядка, т. е. осуществляя биномиальную фильтрацию

$$\det(sI_3 - A_H) = s^3 + 2\Omega_0 s^2 + 2\Omega_0^2 s + \Omega_0^3,$$

находим неизвестные коэффициенты характеристического многочлена:

$$l_1 = 2\Omega_0, \quad l_2 = 2I_x \Omega_0^2, \quad l_3 = I_x \Omega_0^3.$$

Согласно выбранному многочлену Баттерворта, параметр Ω_0 задает быстродействие системы. Время переходного процесса t_p можно оценить по формуле $t_p = 5/\Omega_0$. Полученный наблюдатель представим системой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_x(t) = -l_1 \hat{\omega}_x(t) + \hat{M}(t) / I_x + l_1 \omega_x(t) + u(t) / I_x; \\ \dot{\hat{M}}(t) = -l_2 \hat{\omega}_x(t) + \hat{v}(t) + l_2 \omega_x(t); \\ \dot{\hat{v}}(t) = -l_3 \hat{\omega}_x(t) + l_3 \omega_x(t). \end{cases} \quad (8)$$

Результаты моделирования системы (8) в среде MatLab представлены на рис. 1 и 2 (сплошная линия).

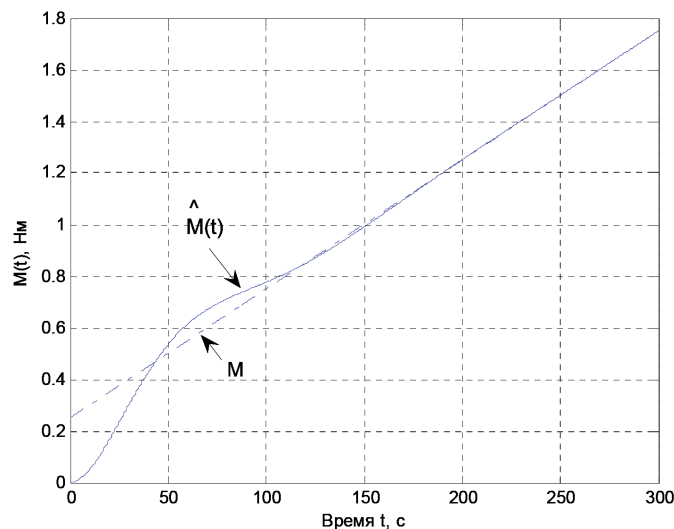


Рис. 1. Переходный процесс оценивания возмущений в обобщенной системе

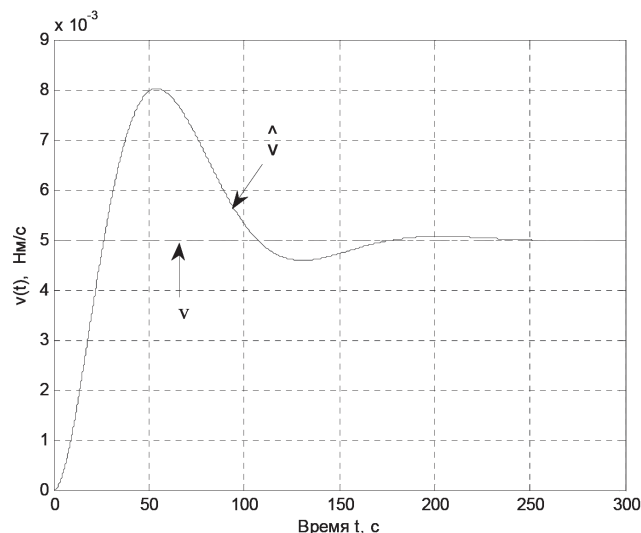


Рис. 2. Переходный процесс оценивания шумов измерений

Из графиков видно, что время переходного процесса в наблюдателе составляет не более 100 с. Параметры моделируемой системы: $I_x = 1000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M(0) = 0,25 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $v(0) = 5\cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{с}$; $\Omega_0 = 0,05 \text{ 1}/\text{с}$. На графиках показаны моменты переключения, отражающие специфику объекта, из которых следует, что время переходного процесса зависит от численных значений параметров модели, а также от установившихся значений переменных состояния.

Выводы

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритма наблюдателя полной размерности с использованием модели расширенной системы «объект – среда», что позволяет получить оценки векторов возмущений и шумов измерений по доступным измерениям вектору выхода — угловой скорости крена. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примерах расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

Модальный метод синтеза наблюдателя и алгоритм его реализации в приложении к модели судна с заданной структурой позволяют получить простые решения для управления свободными составляющими движения, однозначно определяемыми по совокупности собственных значений матрицы замкнутой системы. Для линейной модели наблюдателя устойчивость гарантируется обоснованным выбором характеристического многочлена наблюдателя — многочлена Баттерворта третьего порядка, корни которого несущественно отличаются от корней характеристического полинома замкнутой системы управления курсом судна. Метод и алгоритм позволили синтезировать наблюдатели с одинаковым спектром с использованием одной из трех переменных состояния в качестве координаты выхода для полного восстановления вектора состояния при любых способах перекладки руля.

Выбор структуры расширенной системы наблюдателя путем введения векторов $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ позволяет предложить способ мониторинга датчиков угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления неизмеряемых переменных состояния, так и других переменных, измерение которых в судовых условиях затруднено.

Предложенный алгоритм численной оценки вектора состояний средствами математического программирования может эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме. Алгоритмы оптимизации судовых объектов и систем средствами математического программирования содержат модели динамических объектов в форме уравнений в пространстве состояний, которые образуют систему ограничений на каждом шаге итерационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А. Е. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна / А. Е. Сазонов, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
2. Сахаров В. В. Синтез оптимального оценщика для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.
3. Чертков А. А. Синтез наблюдателя на основе фильтра Калмана для системы управления динамическим объектом / А. А. Чертков // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2014. — № 1 (12). — С. 66–71.
4. Андриевский Б. Р. Анализ систем в пространстве состояний / Б. Р. Андриевский. — СПб.: ИПМаш РАН, 1997. — 206 с.
5. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.

6. Lewis F. L. Optimal Control / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. — 3rd ed. — N. Y.: John Wiley and Sons, 2012. — 541 p.
7. Witkowska A. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method / A. Witkowska, R. Smierzchalski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2012. — Vol. 22. — Is. 4. — Pp. 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
8. Dhaliwal S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems: Master thesis / S. S. Dhaliwal. — Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011. — 83 p.
9. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
10. Гринкевич Я. М. Наблюдатели и оценщики состояния в судовых системах управления / Я. М. Гринкевич, В. В. Сахаров. — СПб.: СПГУВК, 2001. — 193 с.
11. Садков А. В. Моделирование динамики водоизмещающего речного судна, неустойчивого на курсе / А. В. Садков // Морской Вестник. — 2012. — № 3. — С. 94–96.
12. Агарков С. А. Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 7–11.
13. Митряшкин Ю. В. Линейные модели управляемых динамических систем / Ю. В. Митряшкин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — Ч. 1. Уравнения «вход – выход» и «вход – состояние – выход»: учеб. пособие. — 222 с.
14. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. — 655 с.
15. Гофман А. Д. Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 150 с.
16. Веремей Е. И. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е. И. Веремей, В. М. Корчанов, М. В. Коровкин, С. В. Погожев. — СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.

ALGORITHM OF SHIP COURSE CONTROL SYSTEM WATCHER FOR ASSESSING DISTURBANCES AND NOISE MEASUREMENTS

The aim of this work is to improve the quality of indicators hold vessel on course — improving the accuracy and reliability of ship management in relation to disturbance bank angle, the angular velocity of rotation and noise measurements that require trade-offs related to the choice of system performance and accuracy evaluation of vector State. In the wild state vector is not always available for measurement. No less challenging is the measurement of disturbances that lead to the emergence of additional components error estimation of state variables and reduce the accuracy of the control. For the implementation of the system in real time assessment shall be carried out using methods and computational stochastic procedures and, in particular, binomial filter.

The method of synthesis of dynamic observer full dimension (Kalman observer) that is different in that it allows you to reduce the error of estimate the state variables of the channel object, functioning in the face of changing external Wednesday, by constructing a model of the extended status object system Wednesday. Score is based on algorithms of linearization of nonlinear state-space models using optimal filtration, laboratory matrix instrumentation and computer technology. An example of the calculation of the three-dimensional dynamic observer to evaluate the perturbation vectors and noise measurements made on the basis of the proposed algorithm. The results of calculation of state variables and perturbations produced using canonical forms of State equations correspond to the best (performance) the transitional processes in the ship models of the object when translating it from the initial state in the settled State in the shortest possible time.

Keywords: ship model, control, the observer, the matrix, vectors and exit a modal method, algorithm synthesis.

REFERENCES

1. Sazonov, Anatoliy Efimovich, Vladimir Vasilevich Saharov, and Alexandr Alexandrovich Chertkov. “A modal method for the synthesis of an observer for heading control.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta*

morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 4(38) (2016): 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.

2. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. “Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.

3. Chertkov, A. “Synthesis of the observer on the basis of filter Kalmana to control system of dynamic object.” *Informacionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, jekonomika, transport, pravo* 1(12) (2014): 66–71.

4. Andrievskij, B. R. *Anmaliz system v prostranstve sostojanija*. SPb.: IPMash RAN, 1997.

5. Andrievskij, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlenija s primerami na jazyke MatLab*. SPb.: Nauka, 2000.

6. Lewis, F. L., D. Vrabie, and V. L. Syrmos. *Optimal Control*. 3rd ed. N.Y.: John Wiley and Sons, 2012.

7. Witkowska, A., and R. Smierzchalski. “Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.4 (2012): 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.

8. Dhaliwal, S. S. *State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems*. Master thesis. Ontario, Canada: Queen’s University Kingston, 2011.

9. Tomera, M. “Nonlinear controller design of a ship autopilot.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.

10. Grinkevich, Ja. M., and V. V. Saharov. *Nabludateli i ocenivateli sostojanija v sudovyh sistemah upravlenija*. SPb.: SPGUWK, 2001.

11. Sadkov, A. V. “Modeling the dynamics of displacement river boat which is course-unstable.” *Morskoy Vestnik* 3 (2012): 94–96.

12. Agarkov, S. A., and S. V. Pashentsev. “Parametric identification of the Nomoto generalized model using the apparatus of variational calculus.” *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 7–11.

13. Mitrjashkin, Ju. V. *Linejnye modeli upravljajemyh dinamicheskikh sistem. Chast 1. Uravnenija «vhod — vyhod» i «vhod — sostojanie — vyhod»: uchebnoe posobie*. M.: izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008.

14. Pupkov, K. A., and N. D. Egupov. *Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija. Tom 1. Matematicheskie modeli, dinamicheskie harakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravlenija*. M.: izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2004.

15. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.

16. Veremey, E. I., V. M. Korchanov, M. V. Korovkin, and S. V. Pogojev. *Kompjuternoe modelirovanie sistem upravlenija dvizeniem morskikh podvijnyh ob’ektov*. SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru
Загrediнов Денис Алексеевич — аспирант.
 Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Михайлов Юрий Борисович — аспирант.
 Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич — доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
yuar640@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov Alexandr Alexandrovich — PhD, associate professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru
Zagredinov Denis Alekseevich — postgraduate.
 Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich — Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
Mihaylov Jurij Borisovich — postgraduate.
 Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich — Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
yuar640@mail.ru