

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466

SYNTHESIS OF ADAPTIVE SHIP COURSE CONTROL SYSTEM BASED ON A LOCAL QUALITY CRITERION

A. A. Dyda, E. P. Chinchukova

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The problem of adaptive control system synthesis using the local criterion is considered. The criterion selection allows you to take into account ship course errors and desired small deviations of rudder.

The theoretical basis for solving this problem is the velocity gradient method. To obtain laws (algorithms) for adjusting the regulator parameters, a local quadratic quality criterion that is oriented on ensuring small deviations from the set course and keeping the ship's heading has been chosen. Adaptive course control systems, obtained on the basis of theoretical research, are modeled in the MATLAB environment. It is shown that the originally obtained adaptation laws can be modified by coarsening due to introducing a negative feedback on the tunable parameter.

The results of modeling the ship course control system under the influence of an external disturbance are also presented in the paper. The algorithm developed in the paper for setting the regulator parameters allows controlling the ship movement along the course under wind-wave action with wave amplitude of 6 degrees and the constant wave component of 6 degrees.

The results of modeling the ship course control system without setting the regulator and with the setting enabled confirm the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: ship control, linear model, nonlinear model, first order Nomoto models, adaptation algorithms, ship model, gradient algorithm, ship course control, numerical simulation, quadratic quality criterion.

For citation:

Dyda, Alexander A., and Elena P. Chinchukova. "Synthesis of adaptive ship course control system based on a local quality criterion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 459–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466.

УДК 681.51

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА

А. А. Дыда, Е. П. Чинчукова

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

Рассмотрена задача синтеза адаптивной системы управления движением судна по курсу с использованием локального квадратичного критерия качества. Выбор критерия связан с необходимостью обеспечить незначительные отклонения курса судна от заданных значений курса при малых углах кладки пера руля. Отмечается, что теоретическую основу решения этой задачи составляет метод скоростного градиента. Для получения законов (алгоритмов) настройки параметров регулятора выбран локальный квадратичный критерий качества, ориентированный на обеспечение малых отклонений от заданного значения курса и сохранение курса судна. Адаптивные системы управления движением судна по курсу, полученные на основе предложенного теоретического исследования, промоделированы в среде MATLAB. Показано, что первоначально полученные законы адаптации могут быть модифицированы путем огрубления за счет введения отрицательной обратной связи по настраиваемому параметру регулятора. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного модифицированного алгоритма адаптивной настройки параметров регулятора системы управления движением судна по курсу с огрублением. В работе представлены результаты моделирования системы адаптивного управления движением судна по курсу под воздействием внешнего возмущения. Разработанный в статье алгоритм адаптивной настройки параметров регулятора позволяет управлять движением судна по курсу при ветро-волновом воздействии с амплитудой волны, равной 6° и постоянной волновой составляющей в 6°. Результаты моделирования

системы управления движением судна по курсу без настройки регулятора и с включенной адаптивной настройкой параметров регулятора подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: управление судном, линейная модель судна, нелинейная модель судна, модель Номото 1-го порядка, метод скоростного градиента, алгоритмы адаптации, численный эксперимент, локальный квадратичный критерий качества, модель судна, управление судном по курсу.

Для цитирования:

Дыда А. А. Синтез адаптивной системы управления курсом судна на основе локального критерия качества / А. А. Дыда, Е. П. Чинчукова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 459–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-459-466.

Введение (Introduction)

Качество систем управления движением судна по курсу имеет большое значение для безопасности судовождения. В традиционных системах управления движением судна по курсу, как правило, судоводитель настраивает коэффициенты регулятора в зависимости от различных условий функционирования судна: его загруженности, глубины и т. д. [1].

Существуют различные виды систем управления движением судна по курсу: адаптивные с нелинейной моделью судна [2], адаптивные с линейной моделью судна, робастные, нейросетевые и др. Анализ особенностей судна и условий его эксплуатации показывает, что для этого объекта управления характерна неопределенность параметров [3]–[5]. Это объясняется изменением загрузки судна, ее распределением, варьирование его осадки, изменением качества поверхности судна и другими факторами. Известно, что изменение параметров управляемого объекта при фиксированных параметрах регулятора может приводить к ухудшению качества процессов в системе управления и даже к потере ее устойчивости, т. е. работоспособности [6]. В связи с этим применение классических методов линейной теории управления может не гарантировать высокое качество процессов в управляющей системе [7]. Методы построения систем с переменной структурой, представляющих класс нелинейных систем, ориентированы на применение сигналов релейного (разрывного) типа, они обеспечивают в определенной степени робастные и пассивные адаптивные свойства, однако представляются сложными для реализации в системах управления движением судна. Методы интеллектуального управления и, в частности, нейросетевые методы построения систем в настоящее время также нашли применение для управления морскими подвижными объектами, однако они не разработаны теоретически в достаточной мере и требуют дальнейшего развития.

Одним из наиболее перспективных среди указанных ранее методов построения системы управления представляется подход, основанный на принципе адаптации, т. е. приспособления параметров управления к изменению управляемого объекта. Известны работы, в которых рассмотрено адаптивное управление движением судна по курсу [8]–[10]. Таким образом, направление с использованием адаптивного управления движением судна по курсу является перспективным.

В настоящей статье представлен подход к разработке адаптивных систем управления движением судна по курсу, основанный на локальном квадратичном критерии качества [1], [11]. Система управления движением судна по курсу должна обеспечивать, с одной стороны, высокую точность движения вдоль траектории, или малую ошибку, а с другой — желательны малые отклонения пера руля для предотвращения потерь скорости судна. Таким образом, выбор критерия качества процессов управления движением судна определяется двумя указанными в работе [1] требованиями, а именно высокой точностью движения вдоль траектории и малыми отклонениями пера руля

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для представления динамики судна воспользуемся моделью Номото первого порядка [12]–[14]. Модель Номото 1-го порядка имеет простейший вид линейного дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$T_c \dot{\omega} + \omega = K_c \delta, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость рысканья; δ — угол перекладки руля; T_c и K_c — параметры управляемости судна.

Для иллюстрации предлагаемого подхода к синтезу системы управления в качестве примера выберем ПИД-регулятор, параметры которого далее будут настраиваться. В этом случае передаточная функция регулятора $W(s)$ имеет следующий вид:

$$W(s) = K_n + K_i \frac{1}{s} + K_d s, \quad (2)$$

где K_n , K_i , K_d — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора соответственно.

Предполагая, что динамикой рулевой машины можно пренебречь в сравнении с динамикой судна [1], общая математическая модель системы управления движением судна по курсу может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= \omega; \\ \dot{\omega} &= \frac{K_c}{T_c} \delta - \frac{1}{T_c} \omega; \\ \delta &= K_n \dot{\varepsilon} + K_i \varepsilon + K_d \ddot{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ — курс судна; ω — угловая скорость судна по курсу; δ — угол поворота пера руля; ε — ошибка по курсу.

Адаптивная настройка параметров регулятора выполнена на основе метода скоростного градиента. Применение данного метода предполагает выбор критерия в качестве процесса управления [1]. Зададимся локальным квадратичным критерием качества [5] в следующем виде:

$$Q = \frac{1}{2} \varepsilon^2 + \frac{c}{2} \delta^2, \quad (4)$$

где ε — отклонение курса судна от заданного значения; δ — отклонение пера руля; c — константа, весовой коэффициент критерия (выбирается либо натурными испытаниями конкретного судна [1], либо таким образом, чтобы получить наименьшее возможное значение квадрата отклонения курса судна при заданной величине угла перекладки руля [1]).

Очевидно, что минимизация выбранного локального квадратичного критерия обеспечивает одновременное уменьшение ошибки по курсу и отклонение пера руля, что способствует, как отмечалось ранее, сохранению продольной скорости хода судна) [1].

В соответствии с методом скоростного градиента необходимо вычислить производную критерия Q по времени вдоль траектории системы. Затем, следуя данным библиографического источника [5], следует записать законы настройки (алгоритмы) ПИД-регулятора:

$$\dot{K}_d = \gamma c \delta \dot{\varepsilon}; \quad \dot{K}_i = \gamma c \delta \varepsilon; \quad \dot{K}_n = \gamma c \delta \varepsilon, \quad (5)$$

где γ — константа, регулирующая скорость настройки параметров.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности системы управления с полученными законами адаптивной настройки параметров регулятора было проведено численное моделирование (рис. 1).

На рис. 2 показано изменение выходного сигнала системы управления движением судна по курсу с адаптивной настройкой параметров регулятора по локальному квадратичному критерию качества.

На рис. 3 показано улучшение локального критерия качества при включении адаптивной настройки в системе управления курсом судна.

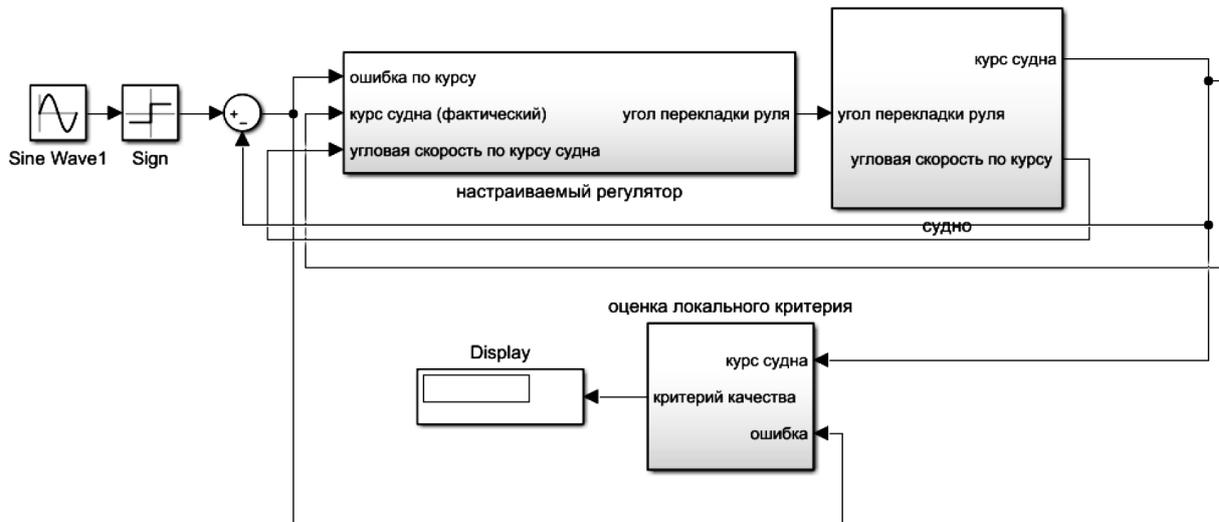


Рис. 1. Схема системы управление в Simulink Matlab

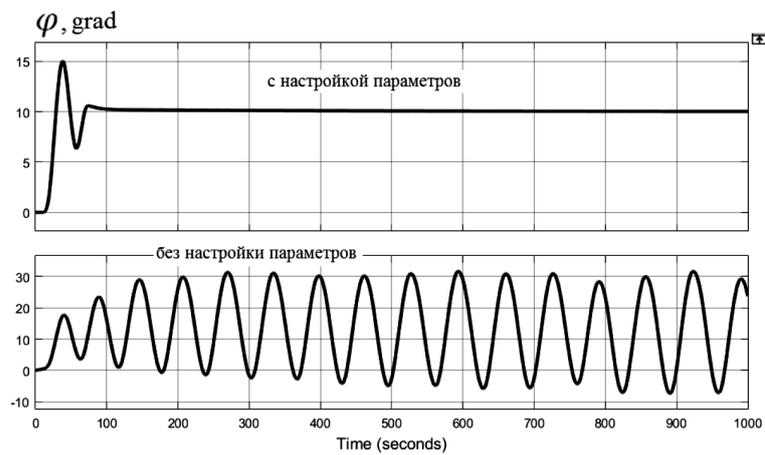


Рис. 2. Выходной сигнал

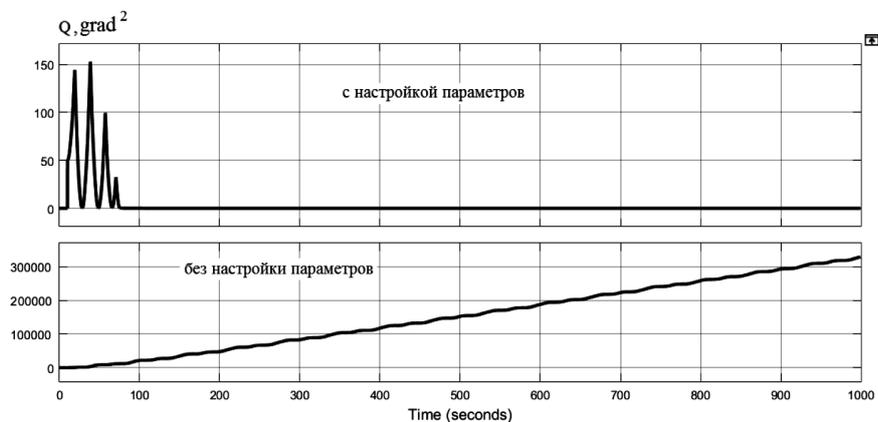


Рис. 3. Изменение локального критерия качества $Q(t)$

Полученный алгоритм наряду с полезными свойствами обладает одним существенным недостатком, отмечаемым в ряде работ по адаптивному управлению [14], в частности, возможным неограниченным ростом параметров регулятора. Это свойство препятствует практической реализации полученной системы управления. Одним из возможных способов преодоления отмеченного

недостатка является огрубление [11] алгоритма адаптивной настройки путем введения отрицательной обратной связи по настраиваемому параметру. В результате модифицированный закон настройки коэффициентов регулятора имеет вид:

$$\dot{K}_d = \gamma c \delta \ddot{\varepsilon} - K_d; \quad \dot{K}_n = \gamma c \delta \dot{\varepsilon} - K_n; \quad \dot{K}_и = \gamma c \delta \varepsilon - K_и. \quad (6)$$

На рис. 4 показан процесс настройки параметров ПИД-регулятора при адаптивной настройке с огрублением.

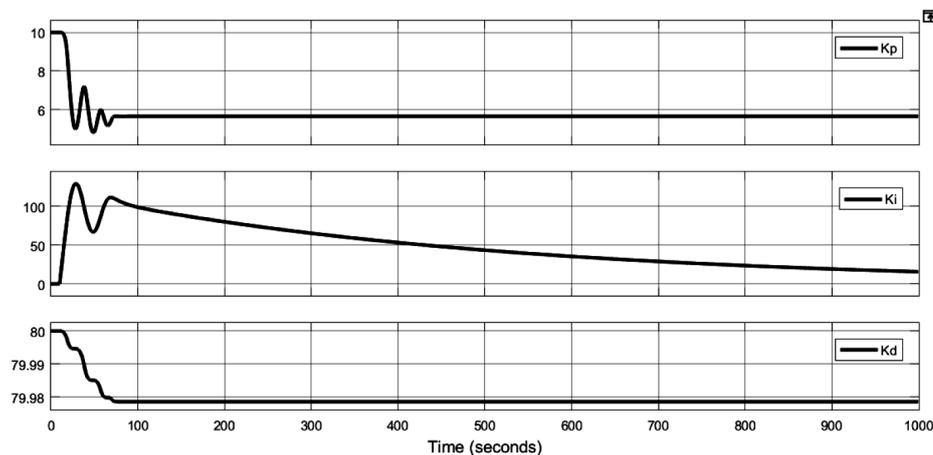


Рис. 4. Графики настройки параметров регулятора

На рис. 5 и 6 показаны, соответственно, процессы управления без адаптации и с адаптивной настройкой параметров регулятора (верхний график — заданный курс судна, нижний — фактический).

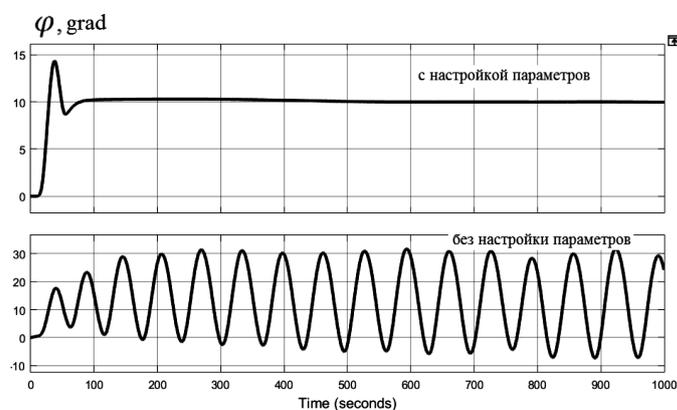


Рис. 5. Выходной сигнал

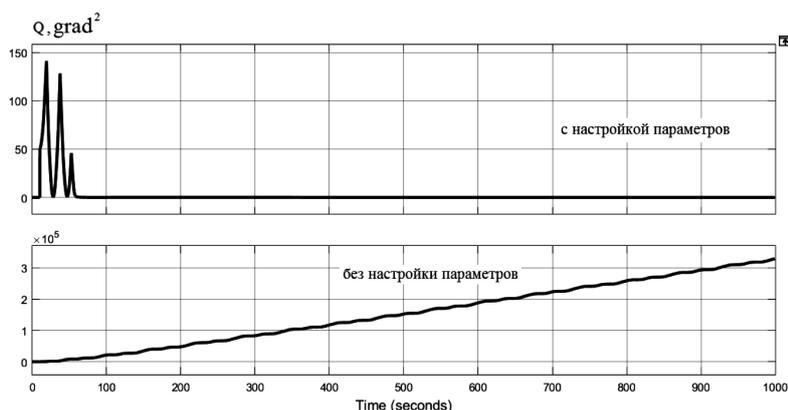


Рис. 6. Изменение локального критерия качества $Q(t)$

Были выполнены исследования точности удержания судна на курсе с разработанным регулятором при наличии внешних ветроволновых возмущений. Для их моделирования в среде Matlab был выбран генератор белого шума и формирующий фильтр [11] второго порядка, представляющий собой колебательное звено, синусоиду и постоянный сигнал (*step*).

Параметры фильтра выбирались таким образом, чтобы спектральная плотность его выходного сигнала соответствовала морскому волнению с амплитудой, равной 6 град., постоянному воздействию, равному 6 град. частотой 3 град./с [15], эквивалентному углу поворота пера руля.

Обсуждение (Discussion)

Вначале исследовались системы управления без настройки параметров ПИД-регулятора. На рис. 2 (нижний график) показано фактическое значение курса судна при заданном ступенчатом курсе (10 град.). При включении полученных ранее законов адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора характер процессов изменяется (см. рис. 2 верхний график). Сравнение результатов моделирования показывает, что применение адаптивной настройки параметров регулятора позволило улучшить качество процессов управления курсом судна — уменьшить колебания переходного процесса (выход судна на курс).

Как видно из сравнения графиков (см. рис. 5 и 6), введение огрубления позволило сохранить полезные свойства настройки, выраженные в улучшении переходных процессов управления курсом судна.

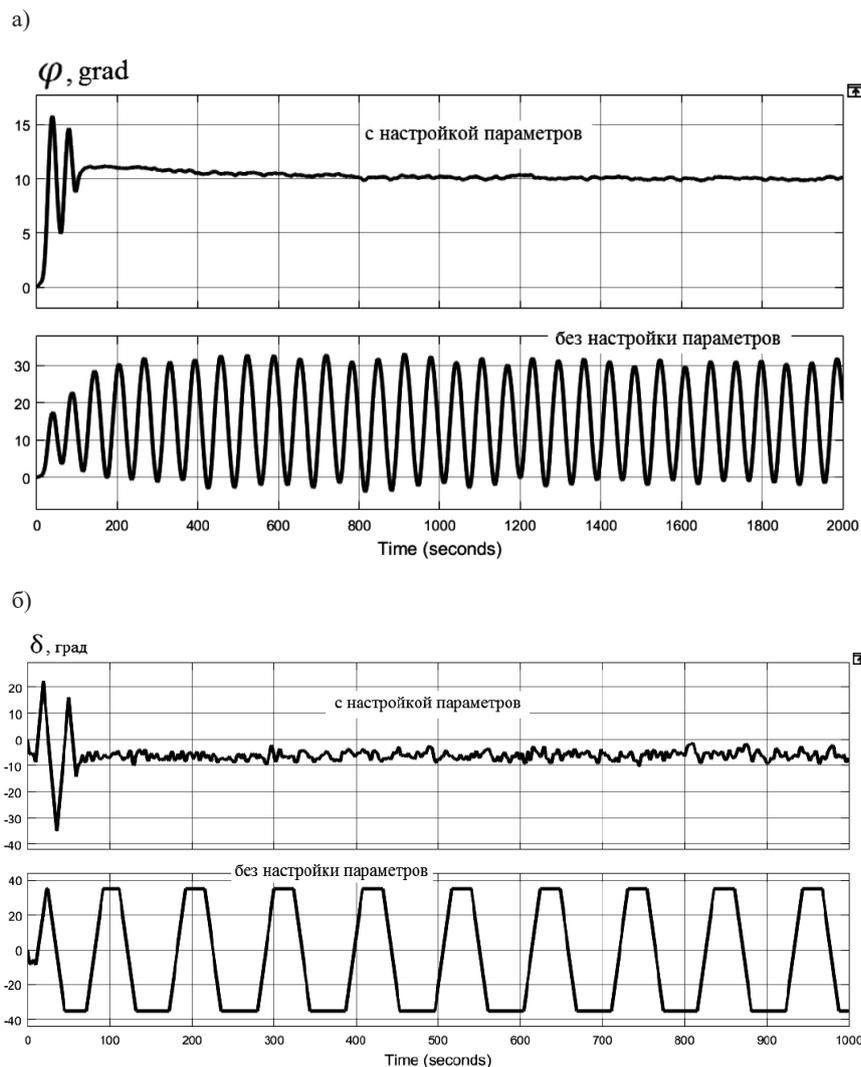


Рис. 7. Выходной сигнал (а) и угол перекадки руля (б) в адаптивной системе и системе с фиксированными параметрами регулятора при наличии возмущения

На рис. 7 показано, что при выполнении адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора по локальному квадратичному критерию судно выходит на курс и удерживается на нем с отклонением ± 2 град. и отклонением угла перекладки руля ± 5 град.

Заключение (Conclusion)

Проведенные в работе исследования показывают, что предложенный подход адаптивной настройки параметров регулятора позволяет обеспечить высокое качество процессов системы управления движением судна по курсу. Применение адаптивной настройки параметров регулятора представляется целесообразным при наличии априорной неопределенности параметров управляемости судна, которые зависят от загрузки судна, скорости хода и других факторов.

Выбранный критерий, на основе которого выполнена система управления, представляет компромиссное решение между точностью движения судна по курсу и сохранением скорости движения судна по курсу. Для адаптивной настройки системы управления, кроме локального квадратичного критерия качества, применяется также интегральный критерий качества. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть проведены с использованием более сложных нелинейных моделей судна и других типов регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чинчукова Е. П. Адаптивная система управления курсом судна с учетом динамики нелинейной рулевой машины на основе локального критерия качества / Е.П. Чинчукова // Морские исследования на Дальнем Востоке: сб. ст. Третьей всеросс. науч.-практ. конф. «Морские исследования на Дальнем Востоке». — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2019. — С. 76–81.
2. Dyda A. A. A nonlinear system with coupled switching surfaces for remotely operated vehicle control / A.A. Dyda, D. Oskin, S. Longhi, A. Monteriù // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49. — Is. 23. — Pp. 311–316. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.360.
3. Van Amerongen J. Adaptive Steering of Ship: A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping. Doctoral thesis / J. van Amerongen; Delft University of Technology. — Delft University Press, 1982. — 195 p.
4. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб: Наука, 2000. — 475 с.
5. Дыда А. А. Параметрическая идентификация модели судна на основе степенных рядов / А. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Е. П. Чинчукова // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4–5 (42). — С. 125–130.
6. Dyda A. A. An adaptive VSS control for remotely operated vehicles / A. A. Dyda, D. A. Oskin, S. Longhi, A. Monteriù // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2017. — Vol. 31. — Is 4. — Pp. 507–521. DOI: 10.1002/acs.2565.
7. Бурылин Я. В. Адаптивное управление угловой скоростью поворота судна / Я. В. Бурылин, А. С. Васильков // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 4 (81). — С. 37–42.
8. Дыда А. А. Адаптивная идентификация параметров моделей судов на основе алгоритма скоростного градиента / А. А. Дыда [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 263–268.
9. Дыда А. А. Адаптивное и нейросетевое управления сложными динамическими объектами / А. А. Дыда. — Владивосток: Дальнаука, 2006. — 149 с.
10. Осокина Е. Б. Параметрическая идентификация системы управления судном на основе модели Номото 2-го порядка / Е. Б. Осокина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 2. — С. 120–123.
11. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы / А. Л. Фрадков. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
12. Nomoto K. A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships / K. Nomoto, N. Norrbín // 12th ITTC Conference, Report of Manoeuvrability Committee, Ap. I., Rome. — 1969.
13. Nomoto K. On the steering qualities of ship / K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano // Journal of Zosen Kiokai. — 1956. — Vol. 1956. — Is. 99. — Pp. 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99_75.
14. Дыда А. А. Задача идентификации в проблеме управления беспилотным судном / А. А. Дыда, Е. Б. Осокина, Е. П. Чинчукова // Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: Сборник докладов национальной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2018. — С. 17–22.

15. Суевалов Л. В. Справочник по расчетам судовых автоматических систем / Л.В. Суевалов. — Л.: Судостроение, 1989. — 408 с.

REFERENCES

1. Chinchukova, E. P. "Adaptivnaya sistema upravleniya kursom sudna s uchetom dinamiki ne-lineinoi rulevoi mashiny na osnove lokal'nogo kriteriya kachestva." *Morskije issledovaniya na Dal'nem Vostoke: Sbornik statei Tre'tei vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Morskije issledovaniya na Dal'nem Vostoke»*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2019. 76–81.
2. Dyda, A. A., D. Oskin, S. Longhi, and A. Monteriù. "A nonlinear system with coupled switching surfaces for remotely operated vehicle control." *IFAC-PapersOnLine* 49.23 (2016): 311–316. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.360.
3. Van Amerongen, J. Adaptive Steering of Ship: A model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping. Doctoral thesis. Delft University of Technology. Delft University Press, 1982.
4. Andrievskii, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya*. SPb: Nauka, 2000.
5. Dyda, Aleksandr A., Elena B. Osokina, and Elena P. Chinchukova. "Ship model parameter identification based on power series." *Marine Intelligent Technologies* 4-5(42) (2018): 125–130.
6. Dyda, Alexander A., Dmitry A. Oskin, Sauro Longhi, and Andrea Monteriù. "An adaptive VSS control for remotely operated vehicles." *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 31.4 (2017): 507–521. DOI: 10.1002/acs.2565.
7. Burylin, Y. V., and A. S. Vaskov. "Adaptive regulation of vessel's turn angular velocity." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(81) (2016): 37–42.
8. Dyda, A. A., P. A. Dyda, E. B. Osokina, and D. A. Os'kin. "Adaptivnaya identifikatsiya parametrov modeli sudov na osnove algoritma skorostnogo gradient." *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 263–268.
9. Dyda, A. A. *Adaptivnoe i neurosetevoe upravleniya slozhnymi dinamicheskimi ob'ektami*. Vladivostok: Dal'nauka, 2006.
10. Osokina, E. B. "Parametric identification system ship control based on the model of Nomoto 2-nd order." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 2 (2015): 120–123.
11. Fradkov, A. L. *Adaptivnoe upravlenie v slozhnykh sistemakh: bespoiskovye metody*. M.: Nauka, 1990.
12. Nomoto, K., and N. H. Norrbin. "A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships." *12th ITTC Conference, Report of Manoeuvrability Committee, Ap. I., Rome*. 1969.
13. Nomoto, Kensaku, Kenshi Taguchi, Keinosuke Honda, and Susumu Hirano. "On the steering qualities of ships." *Journal of Zosen Kiokai* 1956.99 (1956): 75–82. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.99_75.
14. Dyda, A. A., E. B. Osokina, and E. P. Chinchukova. "A task of identification in pilotless ship control problem." *Perspektivy bespilotnykh tekhnologii na vodnom transporte: Sbornik dokladov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF, 2018. 17–22.
15. Suevalov, L. V. *Spravochnik po raschetam sudovykh avtomaticheskikh sistem*. L.: Sudostroenie, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович —
доктор технических наук, профессор
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: adyda@mail.ru
Чинчукова Елена Павловна —
Старший преподаватель
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: chinchukova_lena@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyda, Alexander A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoi
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: adyda@mail.ru
Chinchukova, Elena P. —
Senior Lecture
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoi
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: chinchukova_lena@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2020 г.

Received: April 6, 2020.