

Научная статья
УДК 681.5
doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42

Система управления курсом судна с компенсацией действия внешних возмущений на работу рулевой машины

Александр Александрович Дыда¹, Нгуен Ван Тхань²,
Дмитрий Александрович Оськин³✉

^{1, 2, 3} Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия, daoskin@mail.ru ✉

Аннотация. Проведено исследование методов синтеза систем автоматического управления курсом морского судна, управляемого рулем. Решение задачи управления курсом судна осуществляется в условиях действия на судно морского волнения. Возмущающее воздействие внешней водной среды приводит к волновому рысканию судна, следствием чего является значительное повышение активности работы рулевой машины, наблюдается ее усиленный износ и потеря в продольной скорости судна. Для снижения влияния волнового воздействия предложен подход, основанный на использовании дополнительно вводимой внутренней модели динамики судна по курсу. Рассматриваемый подход направлен на улучшение режима работы рулевой машины в условиях морского волнения. Для реализации предложенного алгоритма вносятся изменения в исходную систему путем введения параллельно объекту управления внутренней модели и модификации канала обратной связи системы управления. Для описания динамики морского судна используется модель Номото 1-го порядка, модель рулевой машины реализована в соответствии с наложенными ограничениями по скорости и значению перекадки руля. Волновое возмущение имеет характер, близкий к гармоническому. Идентификация параметров внутренней модели может быть проведена предварительно как по маневренным испытаниям, так и процессе эксплуатации. Численные эксперименты, проведенные в системе MATLAB/Simulink, подтвердили перспективность предложенного подхода. Синтез управления в системе с внутренней моделью позволяет в значительной мере нейтрализовать влияние волнового возмущения. Введенные модификации в исходную систему управления позволяют улучшить функционирование рулевой машины, значительно снизив количество перекадок руля в процессе ее работы.

Ключевые слова: система управления курсом судна, внешнее возмущение, рулевая машина, модель динамики, компенсация возмущения

Для цитирования: Дыда А. А., Нгуен Ван Тхань, Оськин Д. А. Система управления курсом судна с компенсацией действия внешних возмущений на работу рулевой машины // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 34–42. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42.

Original article

Ship course control system with compensation of external disturbances on steering gear

Aleksander A. Dyda¹, Nguyen Van Thanh², Dmitry A. Oskin³✉

^{1, 2, 3} Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russia, daoskin@mail.ru ✉

Abstract. The article focuses on developing synthesis methods for automatic heading control systems for the rudder-controlled sea vessel. The solution of the problem of vessel heading control is carried out in the conditions of heavy sea. The disturbing effect of the external water environment causes the vessel yawing, which results in exceeding activity of the steering gear. This leads to its increased wear and loss in the longitudinal speed of the vessel. To reduce the wave effect there has been supposed an approach based on the additionally introduced internal model

of the ship dynamics. The given approach is aimed at improving the operation of the steering gear in rough seas. To implement the proposed algorithm, changes are made to the original system by introducing an internal model in parallel to the control object and modifying the feedback channel of the control system. To describe the sea vessel dynamics there is used the 1st order Nomoto model, the steering gear model is implemented in accordance with the imposed speed limits and the rudder shift value. Wave disturbance is close to harmonic disturbance. The identification of the parameters of the internal model can be carried out in advance, both by maneuvering tests and by the process of operation. Numerical simulations carried out in the MATLAB/Simulink system confirmed the advantage of the proposed approach. The synthesis of control in a system with an internal model makes it possible to significantly neutralize the influence of wave disturbance. The modifications introduced to the original control system help to improve functioning of the steering gear, significantly reducing the number of rudder shifts during operation.

Keywords: vessel heading control system, external disturbance, steering gear, dynamics model, disturbance compensation

For citation: Dyda A. A., Nguyen Van Thanh, Oskin D. A. Ship course control system with compensation of external disturbance on steering gear. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2021;4:34-42. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42.

Введение

Управление движением судна в условиях морского волнения связано со значительным повышением активности работы рулевой машины. Возмущение, создаваемое морским волнением, как составляющая полезных сигналов обратных связей (курса, угловой скорости) поступает на вход регулятора, который формирует управляющее воздействие, подаваемое на вход рулевой машины. Как следствие, рулевая машина избыточно активна, обрабатывая несущественные локальные отклонения судна от курса. Этот эффект в наибольшей степени проявляется в законах управления, использующих производные сигналы (например, в ПД- и ПИД- регуляторах) [1–6]. Несмотря на различные схемные реализации и элементную базу, практически все применяемые в настоящее время на судах отечественные и зарубежные системы автоматического управления судном по курсу для реализации задачи автоматической стабилизации объекта на курсе используют ПИД-регуляторы. Их применение обосновано ввиду достаточной эффективности в управлении сложными динамическими объектами, такими как морские суда, математические модели которых достаточно сложно формализовать.

Материалы исследования

На современных судах используются несколько типов рулевых машин, отличающихся по принципу действия и конструктивному исполнению, но основное назначение рулевого устройства – обеспечение управляемости судна. Рулевое устройство служит для изменения направления движения судна и безопасности его плавания при воздействии ветра, течения и волн, а также для маневрирования в узких фарватерах, портах и при расхождении судов в море. В отношении рулевых устройств применяются требования Российского морского регистра судоходства к судовым рулевым приводам, ограничивающие активное использование рулевой машины. Это связано с тем, что активная работа рулевой машины судна при морском волнении ведет к ее усиленному износу и, следовательно, нежелательна.

Целью настоящего исследования является изучение подхода к снижению активности рулевой машины в условиях морского волнения за счет использования модели динамики судна и компенсации влияния возмущения. Применение моделей современной теории управления, например таких, как эталонные, настраиваемые и другие виды модели, известно [6]. Специфика настоящей работы состоит в том, что вводимая в контур управления модель динамики судна используется для компенсации влияния волнового рыскания на работу исполнительного механизма системы управления курсом судна.

Типовая структурная схема системы управления курсом судна приведена на рис. 1.

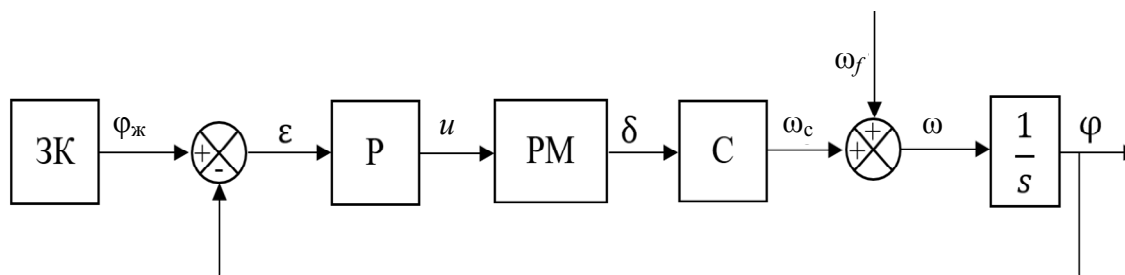


Рис. 1. Структурная схема системы управления курсом судна:

ЗК – задатчик желаемого курса судна $\varphi_{ж}$; Р – регулятор; РМ – рулевая машина; С – судно (динамика); ε – величина рассогласования; φ – курс судна; u – сигнал управления; δ – угол перекадки руля; ω_c – угловая скорость судна; ω_f – внешнее возмущение, определяемое морским волнением

Fig. 1. Block diagram of the ship propulsion control system: ЗК - setter of the desired ship course $\varphi_{ж}$; Р - regulator; РМ - steering gear; С - vessel (dynamics); ε - value of the mismatch; φ - ship's course; u - control signal; δ - rudder shift angle; ω_c - angular speed of the vessel; ω_f - external disturbance by sea waves

Одной из распространенных моделей описания движения судна на курсе является так называемая модель Номото 2-го порядка [7], которая представляет собой дифференциальное уравнение вида

$$T_1 T_2 \ddot{\omega}_c + (T_1 + T_2) \dot{\omega}_c + \omega_c = K_c (\delta + T_0 \dot{\delta}),$$

где ω_c – скорость изменения курса судна (скорость рысканья); δ – угол отклонения пера руля; T_0, T_1, T_2, K_c – динамические параметры, которые зависят от линейной скорости судна.

Эта модель может быть упрощена и приведена к модели Номото 1-го порядка:

$$T_c \dot{\omega}_y + \omega_y = K_c \delta,$$

где $T_c \approx T_1 + T_2 - T_0$.

Приведенные линейные модели обычно используются для анализа управления движением судна по заданному курсу, а также синтеза систем управления движением судна на курсе.

Недостатки приведенных моделей: отсутствие учета внешних воздействий на движение судна; управление осуществляется только одним рулем при установившихся режимах работы двигателя и линейной скорости судна.

Динамика судна в рассматриваемом случае представлена моделью Номото 1-го порядка (что не уменьшает общности подхода) с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{\omega_c}{\delta} = \frac{K_c}{T_c s + 1},$$

где $K_c = 0,09$ град/с; $T_c = 40$ с [2].

Модель динамики судна также представлена инерционным звеном первого порядка:

$$W_M(s) = \frac{\omega_M}{\delta} = \frac{K_M}{T_M s + 1},$$

где K_M, T_M – параметры модели; ω_M – выход модели.

Для полного представления о динамике морского судна можно дополнить приведенную выше модель судна рулевой машиной. Подробно структура рулевого привода рассмотрена в работе [2]. На большинстве судов перо руля имеет ограничение на максимальный угол поворота – примерно 35 град в каждую сторону. Учет данного фактора вводит нелинейность типа «ограничение» в схему рулевой машины. Кроме того, скорость поворота пера руля ограничивается до 2,5 град/с в каждую сторону. Также система управления положением руля, как правило, является следящей, т. е. в ней присутствует обратная отрицательная связь [2, 7].

На рис. 2 представлена модель РМ с учетом приведенных ограничений.



Рис. 2. Модель рулевой машины

Fig. 2. Steering gear model

Приведенная модель позволяет достаточно точно описать динамику реальной РМ с учетом наложенных ограничений по скорости и диапазону перекладки руля, что приведет к более адекватному восприятию процессов, протекающих в реальной системе управления судном. Предполагается также, что волновое возмущение имеет характер, близкий к гармоническому. Такое допущение оправдано тем, что инерционные свойства судна обеспечивают выделение основной низкочастотной гармонической составляющей в спектре морского волнения и подавление высокочастотных гармоник [7–9].

Параметры модели могут быть предварительно определены по результатам предварительных испытаний. Для этого может быть использован как метод наименьших квадратов [8], так и адаптивные градиентные методы [9].

Будем полагать, что в результате идентификации параметры динамики судна K_c и T_c определены достаточно точно, параметры K_m и T_m выбраны из условия $K_m = K_c$ и $T_m = T_c$.

На рис. 3, 4 представлены графики переходного процесса курса судна $\varphi(t)$ в системе с ПД-регулятором и угла перекладки руля судна $\delta(t)$, полученные при моделировании системы управления курсом судна (см. рис. 1) в условиях морского волнения. Математическое моделирование выполнялось в среде MATLAB/Simulink [10].

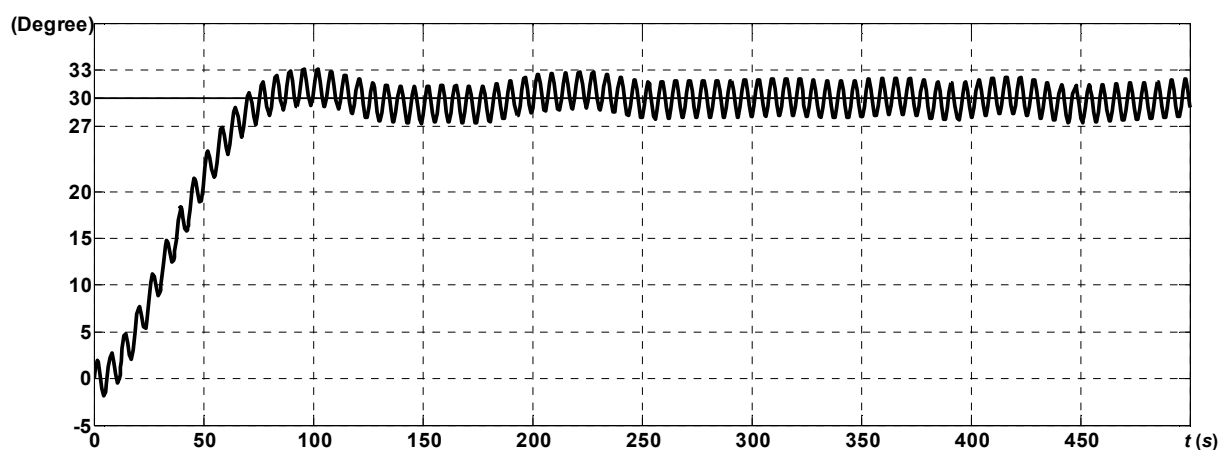


Рис. 3. Переходный процесс $\varphi(t)$ системы управления курсом судна с ПД-регулятором при $K_p = 15$, $K_d = 260$

Fig. 3. Transient process $\varphi(t)$ of the ship propulsion control system with PD-controller at $K_p = 15$, $K_d = 260$

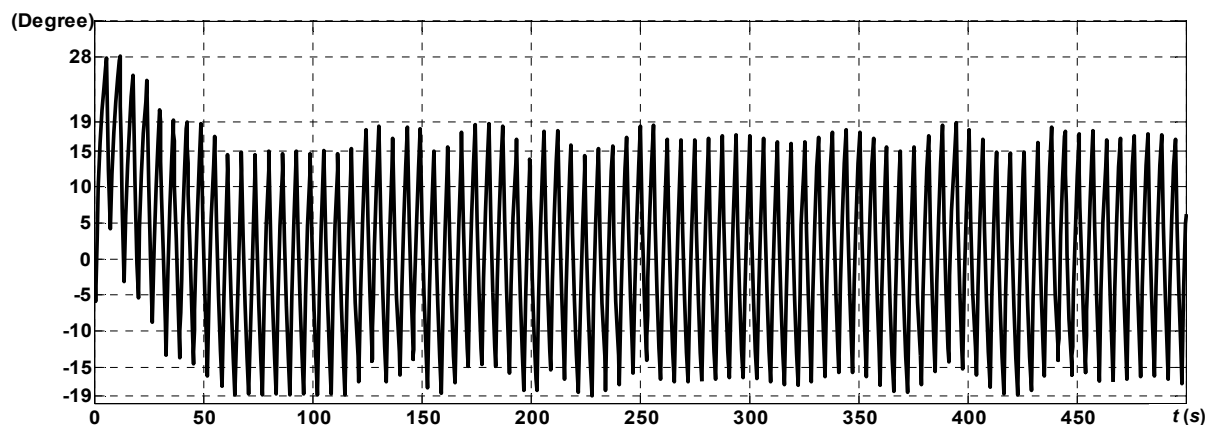


Рис. 4. Угол перекадки руля $\delta(t)$ системы управления курсом судна с ПД-регулятором

Fig. 4. Rudder shift angle $\delta(t)$ of the ship propulsion control system with PD-controller

Результаты подтверждают, что удержание на курсе судна происходит, но с высокой частотой колебаний вдоль заданного курса, при этом РМ работает непрерывно, осуществляя переключения в широком диапазоне, что неприемлемо с точки зрения эксплуатационных характеристик.

В современной теории управления разработаны различные подходы к проектированию систем управления [1–6], опубликовано большое число работ, однако исчерпывающим образом проблема синтеза законов управления для морских судов, функционирующих в условиях внешних ветро-волновых воздействий, не решена. Однако в ряде работ [11, 12] отмечается использование структуры управления с внутренней моделью (англ. Internal Model Control, ИМС), доказывающее достаточно качественное управление системы с внешними возмущениями. Структура системы управления с внутренней моделью характеризуется наличием регулятора, объекта управления, находящегося под воздействием внешнего возмущения, и внутренней модели объекта управления (рис. 5). Системы управления с внутренней моделью подтвердили устойчивость к возмущениям в случае линейной модели процесса [13].

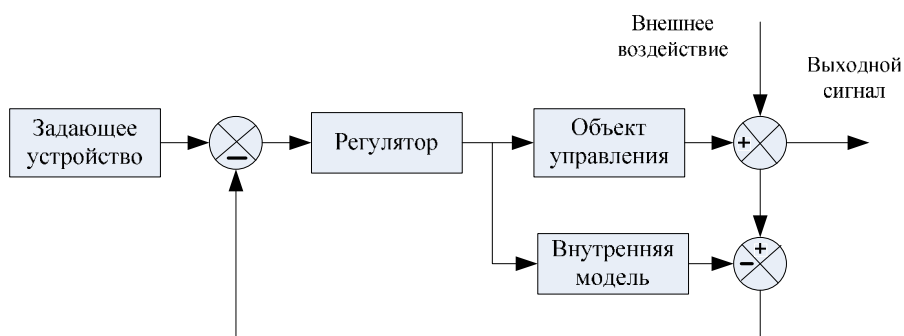


Рис. 5. Структура системы управления с внутренней моделью

Fig. 5. Structure of a control system with internal model

Рассмотрим принцип построения системы с внутренней моделью для синтеза системы управления курсом морского судна под воздействием волнового возмущения. Предположим, что путем идентификации построена достаточно точная математическая модель динамики судна, управляемого по курсу [8, 9]. Это позволяет с высокой степенью точности оценить угловую скорость судна $\omega_c(t)$ как реакцию на изменение угла поворота руля $\delta(t)$ при отсутствии внешнего волнового возмущения. В этом случае разница между реальной угловой скоростью судна, содержащей возмущающую составляющую, и выходом модели $\omega_m(t)$ соответствует волновому возмущению $\omega(t)$.

Интегрирование угловой скорости судна дает его курс, при этом удержание судна на курсе характеризуется рысканием. Интегрирование же возмущения, а точнее, его оценки $\dot{f}(t)$ (в связи с неизбежными погрешностями) позволяет определить его влияние на курс судна и учесть его в процессе управления.

На рис. 6 приведена модифицированная система управления курсом судна, в которую введены дополнительные элементы (относительно схемы на рис. 1). Модель динамики судна (М) позволяет определять по углу перекадки руля $\delta(t)$ угловую скорость судна $\omega_M(t)$ при отсутствии возмущения.

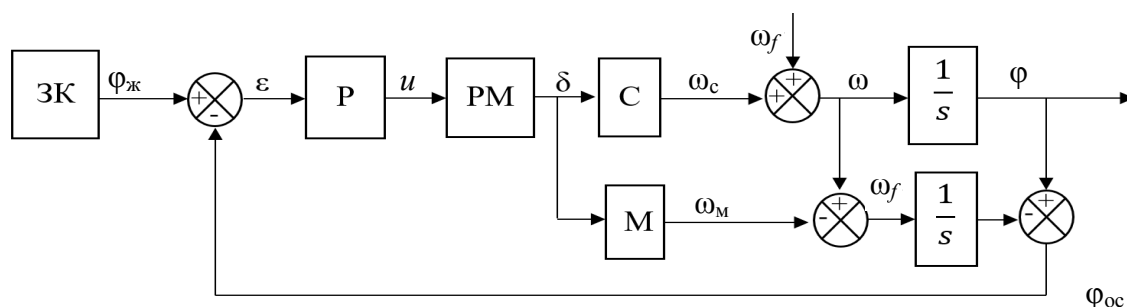


Рис. 6. Система управления курсом судна с компенсацией внешних возмущений

Fig. 6. Ship propulsion control system with compensation of external disturbances

Датчик, измеряющий действующую скорость рыскания судна, формирует сигнал (рис. 6):

$$\omega(t) = \omega_c(t) + \omega_f(t),$$

где $\omega_c(t)$ – угловая скорость без учета возмущения; $\omega_f(t)$ – угловая скорость судна, вызванная волновым возмущением.

При достаточно высокой степени адекватности модели можно прийти к следующему соотношению:

$$\omega_c(t) \approx \omega_M(t).$$

Таким образом, оценку величины возмущающей составляющей $\omega_f(t)$ можно оценить следующим образом:

$$\omega_f(t) \approx \omega(t) - \omega_M(t).$$

Так как курс судна $\phi(t)$ определяется интегрированием величины угловой скорости $\omega(t)$ по времени, то вклад возмущения в $\phi(t)$ также определяется интегрированием.

Сигнал обратной связи формируется согласно выражению

$$\phi_{oc} = \phi - \int \omega_f dt.$$

Для уменьшения активности работы РМ в цепях обратной связи в предложенной системе управления устраняется быстрая составляющая, соответствующая волновому возмущению, и выделяется полезная медленная составляющая в сигнале $\phi(t)$.

Проверка предложенного решения была проведена на основе модели системы управления курсом судна с компенсацией влияния волнового возмущающего воздействия, разработанной в среде MATLAB/Simulink [10]. На рис. 7, 8 представлены графики изменения курса $\phi(t)$ и угла перекадки руля $\delta(t)$ при использовании предложенной схемы компенсации влияния морского волнения.

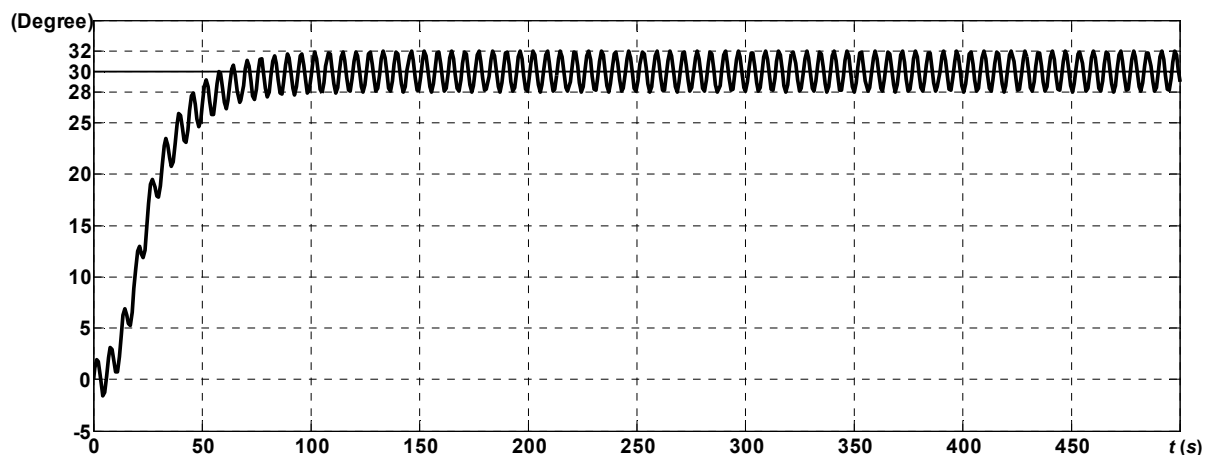


Рис. 7. Переходный процесс $\varphi(t)$ системы управления курсом судна с компенсацией внешних возмущений

Fig. 7. Transient process $\varphi(t)$ of the ship propulsion control system with compensation of external disturbances

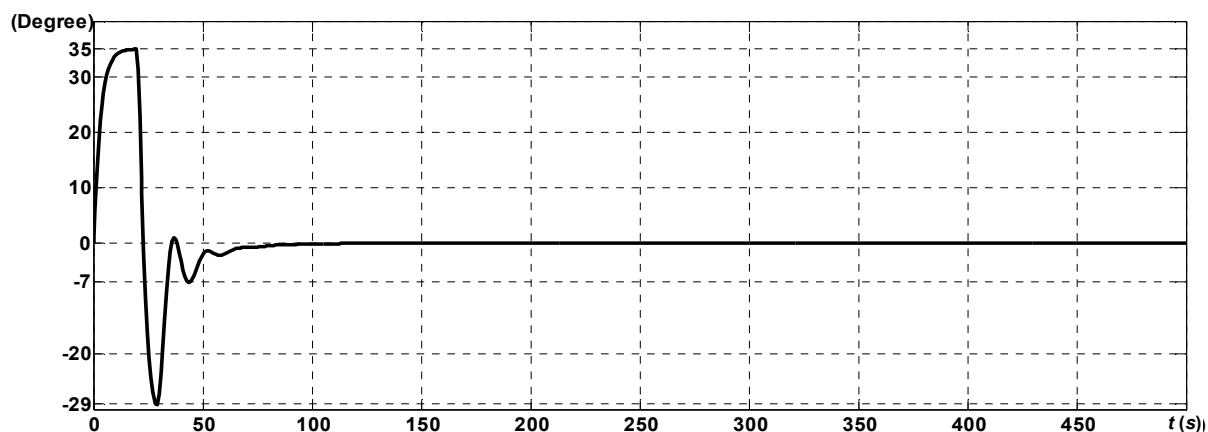


Рис. 8. Угол перекладки руля $\delta(t)$ системы управления курсом судна с компенсацией внешних возмущений

Fig. 8. Rudder shift angle $\delta(t)$ of the ship propulsion control system with compensation of external disturbances

В отличие от результатов, приведенных на рис. 4, введение модели для формирования сигнала обратной связи, компенсирующего внешнее возмущение, приводит к уменьшению интенсивности работы РМ, что существенно улучшает эксплуатационные показатели (рис. 8). При этом поведение судна на курсе практически не изменилось (рис. 7).

Заключение

Таким образом, предложенный подход позволяет существенно снизить активность работы рулевой машины и, следовательно, рационально использовать ее ресурс. Разработанная схема компенсации для системы управления курсом судна позволяет игнорировать локальное отклонение от заданного направления и сохраняет при этом достаточную точность стабилизации курса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бесекецкий В. А., Попов Е. П. Теория автоматического управления. СПб.: Профессия, 2007. 752 с.
2. Вагуценко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
3. Демин С. И., Жуков Е. И., Кубачев Н. А. Управление судном: учеб. М.: Транспорт, 1991. 359 с.
4. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1 // Современ. технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74.

5. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
7. Оськин Д. А., Глазунов В. В., Воробьева С. А. Анализ математических моделей морских судов для задач управления движением // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 96–99.
8. Оськин Д. А. Идентификация параметров математической модели морского судна // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 2. С. 141–145.
9. Осокина Е. Б., Оськин Д. А., Дыда А. А. Адаптивная идентификация параметров судна на основе простых моделей // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 2 (30). С. 24–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31.
10. Сирота А. А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в Matlab: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 384 с.
11. Kazantzidou Christina, Perez Tristan, Donaire Alejandro, Valentinis Francis. Internal model control for rudder roll stabilisation and course keeping of a surface marine craft. In Miskovic, N (Ed.) *Proceedings of the 11th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2018* (IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, Iss. 29). International Federation of Automatic Control (IFAC), France. P. 457–462.
12. Hammound S. Ship Motion Control Using Multi-Controller Structure // *Journal of Maritime Research*. 2012. Vol. IX (1). P. 45–52.
13. Peng Zhang. Chapter 19 - Industrial control system simulation routines // *Advanced Industrial Control Technology*. William Andrew Publishing, 2010. P. 781–810.

REFERENCES

1. Besekerskii V. A., Popov E. P. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [Theory of automatic control]. Saint-Petersburg, Professia Publ., 2007. 752 p.
2. Vagushchenko L. L., Tsymbal N. N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniia dvizheniem sudna* [Systems of automatic control of ship propulsion]. Odessa, Feniks Publ., 2007. 328 p.
3. Demin S. I., Zhukov E. I., Kubachev N. A. *Upravlenie sudnom: uchebnyk* [Ship navigation: textbook]. Moscow, Transport Publ., 1991. 359 p.
4. Denisenko V. PID-regulatory: printsipy postroeniia i modifikatsii. Chast' 1 [PID controllers: principles of construction and modification. Part 1]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2006, no. 4, pp. 66-74.
5. Rotach V. Ia. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [Theory of automatic control]. Moscow, Izd-vo MEI, 2004. 400 p.
6. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniia* [Handbook on automatic control theory]. Pod redaktsiei A. A. Krasovskogo. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
7. Os'kin D. A., Glazunov V. V., Vorob'eva S. A. Analiz matematicheskikh modelei morskikh sudov dlia zadach upravleniia dvizheniem [Analysis of mathematical models of sea vessels for navigation control problems]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2010, no. 1, pp. 96-99.
8. Os'kin D. A. Identifikatsiia parametrov matematicheskoi modeli morskogo sudna [Identification of parameters of sea vessel mathematical model]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2011, no. 2, pp. 141-145.
9. Osokina E. B., Os'kin D. A., Dyda A. A. Adaptivnaia identifikatsiia parametrov sudna na osnove prostykh modelei [Adaptive identification of vessel parameters based on simple models]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2015, no. 2 (30), pp. 24-31. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-24-31.
10. Sirota A. A. *Metody i algoritmy analiza dannykh i ikh modelirovanie v Matlab: uchebnoe posobie* [Methods and algorithms for data analysis and their modeling in Matlab: tutorial]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2016. 384 p.
11. Kazantzidou Christina, Perez Tristan, Donaire Alejandro, Valentinis Francis. Internal model control for rudder roll stabilisation and course keeping of a surface marine craft. In Miskovic, N (Ed.) *Proceedings of the 11th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2018* (IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, Iss. 29). International Federation of Automatic Control (IFAC), France. Pp. 457–462.
12. Hammound S. Ship Motion Control Using Multi-Controller Structure. *Journal of Maritime Research*, 2012, vol. IX (1), pp. 45-52.
13. Peng Zhang. *Chapter 19 - Industrial control system simulation routines*. Advanced Industrial Control Technology. William Andrew Publishing, 2010. Pp. 781-810.

Статья поступила в редакцию 30.07.2021; одобрена после рецензирования 11.10.2021; принята к публикации 14.10.2021.
The article was submitted 30.07.2021; approved after reviewing 11.10.2021; accepted for publication 14.10.2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович Дыда – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры автоматических и информационных систем; Морской государственной университет им. адмирала Г. И. Невельского; 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; adyda@mail.ru

Нгуен Ван Тхань – аспирант кафедры автоматических и информационных систем; Морской государственной университет им. адмирала Г. И. Невельского; 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; thanhnv.hvhq@gmail.com

Дмитрий Александрович Оськин – кандидат технических наук, доцент; зав. кафедрой электронной и микропроцессорной техники; Морской государственной университет им. адмирала Г. И. Невельского; 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а; daoskin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander A. Dyda – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Automatic and Information Systems; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; 690059, Vladivostok, 50a, Verkhneportovaya St.; adyda@mail.ru

Nguyen Van Thanh – Postgraduate Student of the Department of Automatic and Information Systems; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; 690059, Vladivostok, 50a, Verkhneportovaya St.; thanhnv.hvhq@gmail.com

Dmitry A. Oskin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Electronic and Microprocessor Engineering; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; 690059, Vladivostok, 50a, Verkhneportovaya St.; daoskin@mail.ru

