

УДК 519.68:15:681.5

В.М. Гриняк<sup>1</sup>

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
Владивосток. Россия

С.С. Пашин<sup>2</sup>

Дальневосточный федеральный университет  
Владивосток. Россия

## **Управление движением судна по программной траектории при параметрической неопределенности с использованием ПИД-регулятора**

Работа посвящена проблеме обеспечения безопасного движения судов на морских акваториях. Особое место в рамках этой проблемы занимает задача планирования пути: траектории движения судна на локальной акватории и маршрута перехода от порта отправления к порту назначения. Целью планирования траектории судна на локальной акватории является обеспечение навигационной безопасности в условиях коллективного движения и географических особенностей акватории. В настоящей работе рассматривается задача управления судном при его следовании по программной траектории. В статье отмечается, что погрешность априорных представлений о модели движения судна может существенно сказаться на поведении судна в процессе управления, точность управления может стать недостаточной в условиях высокой интенсивности движения, что может привести к опасным сближениям судов. Для решения этой проблемы предлагается включить в систему управления судном ПИД-регулятор, работающий по отклонению от курса, интеграла от этого отклонения и производной от него, а также функцию идентификации модели движения объекта методом скоростного градиента, реализуя замкнутую систему. В качестве модели движения судна принята известная модель Номото второго порядка. Представлены результаты моделирования предложенной системы управления судном. Показано, что она способна работать в рамках единого процесса в режиме

---

<sup>1</sup> Гриняк Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных технологий и систем; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

<sup>2</sup> Пашин Сергей Сергеевич – ст. преподаватель кафедры информационных систем управления ДВФУ; e-mail: aych@yandex.ru

реального времени и адекватно реагировать на изменения параметров модели движения.

**Ключевые слова и словосочетания:** безопасность судовождения, управление судном, траектория движения, ПИД-регулятор, модель Номото, моделирование.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service  
Vladivostok, Russia

S.S. Pashin

Far Eastern Federal University  
Vladivostok, Russia

## Using PID-controller for ship course control under parametric uncertainty

The paper is devoted to the problem of marine traffic safety. A special place within the framework of this problem is occupied by the task of planning the path: the trajectory of the vessel's movement in the local water area and the transition route from the port of departure to the port of destination. The purpose of planning the vessel's trajectory in the local water area is to ensure navigation safety in the conditions of collective movement and geographical features of the water area. In the present work, the task of controlling the vessel when it follows a program trajectory is considered.

The article notes that the error of a priori ideas about the model of vessel movement can significantly affect the behavior of the vessel in the management process, the accuracy of control may become insufficient in conditions of high traffic intensity, which can lead to dangerous approaches of vessels. To solve this problem, it is proposed to include in the ship's control system a PID controller that operates on the deviation from the course, the integral from this deviation and its derivative, and also the function of identifying the model of movement of an object using the speed gradient method, implementing a closed system. As a model of the movement of the vessel adopted the well-known model Nomoto second order.

The article is accompanied by the results of modeling the proposed ship control system. It is shown that it is able to work within a single process in real time and respond adequately to changes in the parameters of the motion model.

**Keywords:** marine safety, ship control, trajectory, PID-controller, Nomoto model, modelling.

**Введение.** Обеспечение безопасности движения судов – это актуальная, сложная и многоаспектная проблема, постоянно привлекающая внимание исследователей. В рамках этой проблемы выделяются задачи планирования пути – траектории движения судна на локальной акватории, целью которой является обеспечение навигационной безопасности движения при наличии препятствий и в условиях коллективного движения [1; 2].

Движение по заданной траектории связано с решением известной задачи выбора необходимых скорости и курса судна с учетом его динамических харак-

теристик [3]. Основная сложность решения этой задачи связана с тем, что управление скоростью и курсом осуществляется не напрямую, а посредством выбора режима работы двигателя, положения пера руля, а для некоторых типов судов – и параметров работы специальных дополнительных рулевых устройств. При неустановившихся режимах движения зависимость скорости и курса от параметров работы органов управления судна является сложной и трудно идентифицируемой. Плавание в условиях ветра и волнения сопровождается качкой и рысканьем, дрейфом от течения и ветра, которые ещё более усложняют реализацию судном (удержание) проложенной траектории. Особое звучание данная проблематика получает в контексте решения задач создания беспилотных морских транспортных средств (self-driving).

Синтез закона управления в рассматриваемой задаче связан с учётом динамики судна и действующих на него возмущений с помощью моделей различной степени полноты. Известная полная математическая модель пространственного движения судна содержит двенадцать нелинейных дифференциальных уравнений и мало пригодна для исследования систем управления [4; 5]. Её анализ настолько сложен, что не позволяет восстановить общую картину процессов управления движением. Синтез управления по упрощенным моделям приводит к более простым структурным решениям, доступным для технической реализации. Один из подходов к такому упрощению заключается в раздельном анализе элементарных движений судна [6]. Это позволяет выделить для самостоятельного исследования из общего пространственного движения бортовую, килевую и вертикальную качки, поступательное движение, рысканье корабля и боковой снос. Каждое из этих элементарных движений описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка, решение которых хорошо изучено [Там же].

Классической задачей управления движением судна является его стабилизация на заданном курсе. Удержание судна на заданной траектории осуществляется путем выработки тем или иным способом поправок к заданному курсу, который полагается равным курсовому углу участка траектории, и стабилизации на этом откорректированном курсе. При этом необходимо достаточно точное знание о его модели и для синтеза качественной системы управления требуется решение задачи параметрической идентификации [7]. Погрешности априорных представлений о модели движения судна могут значительно повлиять на поведение судна в процессе управления. Точности такого управления может быть недостаточно в условиях высокой интенсивности движения, где оно может привести к опасным сближениям судов [8; 9]. Даже если модель движения судна хорошо идентифицирована при испытаниях, её характеристики могут значительно изменяться в процессе эксплуатации (изменение геометрии корпуса, образование наростов на корпусе, изменение водоизмещения и т.п.).

Перспективным путём повышения качества управления является включение в систему управления пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД, proportional-integral-derivative, PID) регулятора, реализующего управление по отклонению курса, интеграла от этого отклонения и производной от него [4; 5]. Уточняя (идентифицируя) модель движения объекта и настраивая пара-

метры регулятора в рамках единого процесса в режиме реального времени будем иметь замкнутую систему управления судном, адекватно реагирующую на изменения параметров модели его движения.

В настоящей статье рассматривается задача управления курсом движения судна без учета внешних помех. Управляющее воздействие осуществляется с помощью рулевого пера. Критерием качества, согласно устоявшейся традиции [3], является минимизация времени выполнения поворота судна и количества переключений руля. Цель работы состоит в моделировании и оценке характеристик и особенностей систем управления судном, включающих ПИД-регулятор.

**Основные модельные представления.** Оставаясь в рамках традиций, в качестве модели движения судна будем использовать модель Номото второго порядка [10], имеющую вид:

$$T_1 T_2 \ddot{\omega} + (T_1 + T_2) \dot{\omega} + \omega = K (\delta + T_0 \dot{\delta}), \quad (1)$$

где коэффициенты  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K$  – константы;

$\omega$  – угловая скорость судна (скорость рысканья);

$\delta$  – угол поворота пера руля.

Особенность этой модели состоит в том, что её параметры-константы обладают высокой степенью неопределенности.

Пусть система управления судном состоит из регулятора, привода и гирокомаса и имеет структуру, показанную на рис. 1.

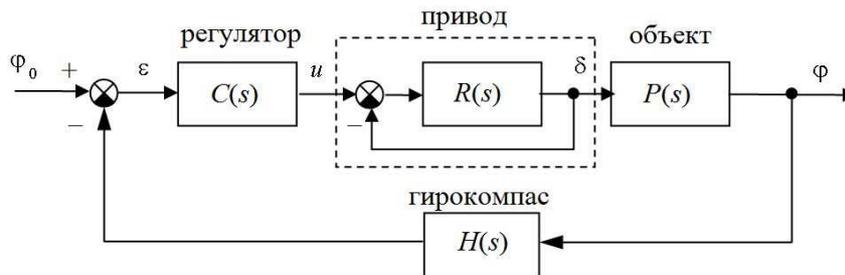


Рис. 1. Схема системы управления курсом судна

На вход системы управления курсом судна (рис. 1) подается желаемый курс –  $\varphi_0$ . Разница фактического курса  $\varphi$  и желаемого  $\varphi_0$  есть некое отклонение  $\varepsilon$ . Регулятору необходимо выработать управляющее воздействие  $u$ , такое, чтобы минимизировать это отклонение. Основываясь на управляющем воздействии  $u$ , привод осуществляет изменение положения пера руля  $\delta$ , тем самым изменяя курс судна.

Передаточная функция звена, описывающего динамику судна, в соответствии с формулой (1) имеет вид:

$$P(s) = \frac{\omega(s)}{s\delta(s)} = \frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_0 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (2)$$

Привод (рулевая машина) моделируется как интегрирующее звено, с единичной отрицательной обратной связью, его передаточная функция имеет вид:

$$R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}. \quad (3)$$

Для измерения угла рыскания используется гироскопас, математическая модель которого записывается в виде апериодического звена первого порядка с передаточной функцией:

$$H(s) = \frac{1}{T_H s + 1}. \quad (4)$$

Общая модель системы управления с ПИД регулятором представлена на рис. 2.

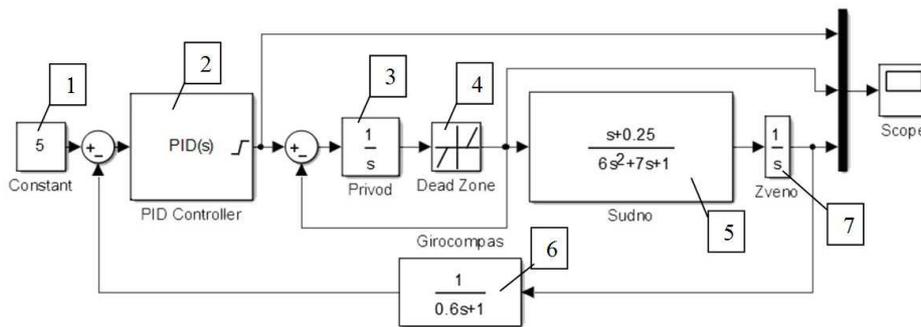


Рис. 2. Модель системы управления с ПИД-регулятором

Модель состоит из следующих блоков: 1) Constant – задает угол поворота судна; 2) PID controller – ПИД-регулятор, вырабатывающий управляющее воздействие; 3) Privod – блок, моделирующий работу привода; 4) Dead Zone – блок, задающий зону нечувствительности; 5) Sudno – блок, моделирующий судно; 6) Girocompas – блок, моделирующий работу гироскопаса; 7) Zveno – интегрирующее звено.

Для адаптивной идентификации параметров движения судна используется известный алгоритм скоростного градиента [11]. Введём вектор состояния системы  $w = (\omega, \dot{\omega})^T$ , включающий в себя угловые скорость и ускорение судна. Уравнение движения судна (1) запишем в виде, характерном для метода скоростного градиента:

$$\dot{w} = Aw + \delta B, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – матрицы с коэффициентами  $A_{11} = -\frac{1}{T_2}$ ;  $A_{22} = -\frac{1}{T_1}$ ;  $A_{12} = -\frac{K}{T_2}$ ;

$$A_{21} = 0; B_1 = \frac{K}{T_0}; B_2 = \frac{(K-1)}{T_0}.$$

Пусть на некотором этапе настройки (итерация с номером  $m$ ) система (5) имеет вид:

$$\dot{w}_m = A_m w_m + \delta B_m + v,$$

где  $v$  – вектор вспомогательных сигналов, позволяющий ускорить процесс настройки параметров [11].

Пусть  $E = w - w_m$  – вектор невязки между реальным и предполагаемым состоянием системы. Введём целевую функцию задачи адаптивной идентификации:

$$Q = \frac{1}{2} E^T E.$$

Её производная будет иметь вид:

$$\dot{Q} = E^T ((A - A_m)w + (B - B_m)\delta - v).$$

Частные производные последней функции по настраиваемым параметрам модели будут иметь вид:

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial A_m} = -E w^T, \quad \frac{\partial \dot{Q}}{\partial B_m} = -E \delta^T$$

В результате алгоритм настройки параметров модели методом скоростного градиента может быть записан следующим образом:

$$\dot{A}_m = -\gamma E w^T, \quad \dot{B}_m = -\gamma E \delta^T, \quad v = v_0 \text{sign}(E),$$

где  $\gamma$  и  $v_0$  – положительные числа, задающие скорость адаптации настраиваемых параметров. Описанный алгоритм устойчиво сходится при значениях параметров модели, характерных для практики [12].

**Результаты численного моделирования.** Численное моделирование задачи выполнялось для случая типичного рыболовного судна. Были взяты параметры судна РС-450 «Ураганный» длиной 24 м, шириной 7,8 м и водоизмещением 65 т. Его исходные параметры модели Номото получены по результатам натурных испытаний путём наблюдения переходного процесса при левом повороте в балласте и имеют значения  $T_0 = 4.0$ ,  $T_1 = 1.0$ ,  $T_2 = 6.0$ ,  $K = 0.25$ . В этом случае передаточная функция (2) будет иметь вид:

$$P(s) = \frac{s + 0.25}{6.0s^2 + 7.0s + 1.0}.$$

Передаточные функции (3), (4) примем равными

$$R(s) = \frac{1}{s + 1},$$

$$H(s) = \frac{1}{0.6s + 1}.$$

Известно большое количество методов настройки ПИД-регулятора [12], для параметров моделируемой модели судна используется аналитический метод настройки. Целью управления является плавный переходный процесс с малым значением перерегулирования. Зависимость управляющего воздействия ПИД-регулятора от отклонения  $\varepsilon$  (между желаемым и фактическим курсом) описывается уравнением:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}.$$

Настройка ПИД-регулятора аналитическим методом даёт следующие значения параметров:  $K_p = 2.455$ ,  $K_i = 0.093$ ,  $K_d = 2.458$ .

Моделируются 2 случая: поворот судна на 5 градусов при точном знании модели (1); поворот судна на 5 градусов в условиях погрешности априорных представлений о параметрах модели (1).

На рисунке 3 показан результат моделирования поворота судна на 5 градусов при точном знании модели (1).

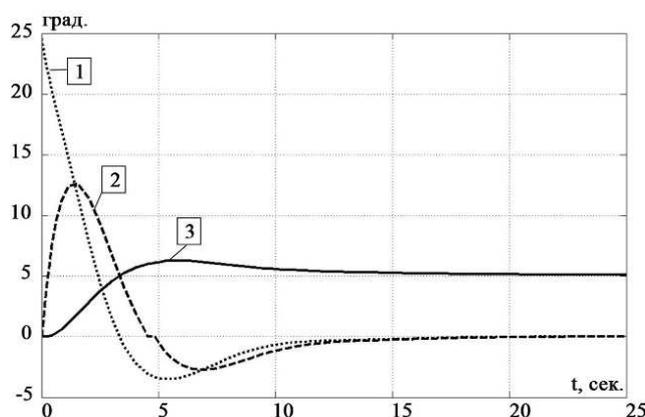


Рис. 3. Результаты моделирования управления судном (поворот на 5 градусов).  
1 – управляющий сигнал с контроллера управления, 2 – угол перекладки пера руля,  
3 – изменение курса судна

Из графиков (рис. 3) видно, что при использовании ПИД-контроллера происходит плавная корректировка курса в течение 25 секунд, вначале ПИД-регулятор подает управляющий сигнал с поворотом пера руля на 13 градусов, тем самым осуществляя быстрый поворот и далее плавную корректировку на заданный курс. В данной модели не учитывается релейная составляющая изменения положений руля, т.е. используется упрощённая модель рулевой машины.

Теперь смоделируем ситуацию, при которой немного изменились параметры судна (изменилась геометрия корпуса судна, дно обросло ракушками и т.д.). Отразим это, изменив постоянную времени в передаточной функции

судна без перенастройки контроллеров, так что передаточная функция судна примет вид:

$$P(s) = \frac{s + 0.5}{6.0s^2 + 7.0s + 1.0}.$$

На рисунке 4 показан результат моделирования поворота судна на 5 градусов в условиях такой погрешности априорных представлений о параметрах модели (1).

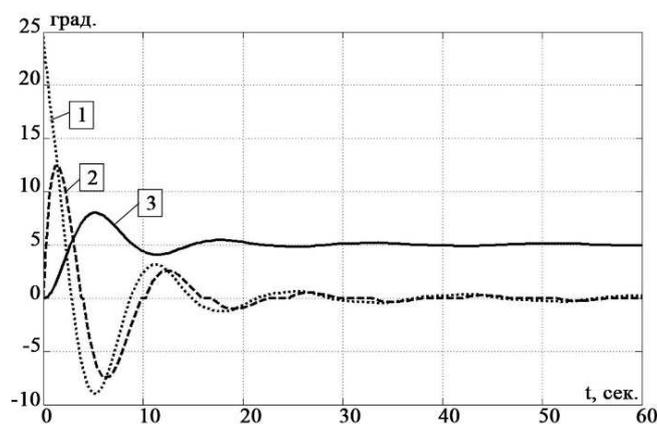


Рис. 4. Результаты моделирования управления судном в условиях погрешности в модели движения (поворот на 5 градусов): 1 – управляющий сигнал с контроллера управления, 2 – угол перекладки пера руля, 3 – изменение курса судна

Из графиков на рис. 4 хорошо видно, что судно делает поворот около 20 секунд, при этом достаточно долгое время происходит колебание курса судна относительно желаемого. При увеличении угла поворота судна разница будет еще более заметной. Более «резкое» поведение ПИД-регулятора связано с его дифференциальной составляющей. На графиках отчетливо видно, что система принимает колебательный характер, тем самым значительно увеличивается количество перекладок руля (график 2 на рис. 4). Использование ПИД-регулятора в условиях сильных возмущающих воздействий или при значительной параметрической неопределенности может привести к полной потере устойчивости в управлении. Таким образом, представляется целесообразной идентификация модели судна.

На рисунке 5 показана реализованная схема алгоритма адаптивной идентификации. Здесь 1 – блок генерирующий задающий сигнал; 2 – модель судна; 3 – блок адаптивной идентификации модели; 4 – блок, показывающий выходной сигнал объекта и настраиваемой модели; 5 – блок, показывающий разницу (невязку) выходного сигнала объекта и модели ( $E$ ).

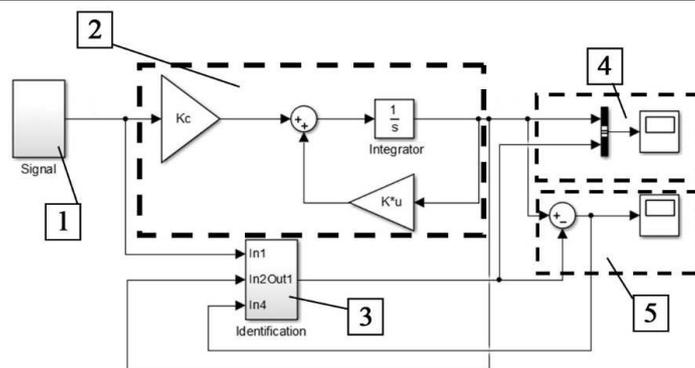


Рис. 5. Система адаптивной идентификации параметров

На рисунке 6 отражены результаты моделирования процесса идентификации модели судна, приведены значения невязки между реальным и предполагаемым состоянием системы ( $E$ ) в процессе идентификации. График 1 показывает разницу между угловой скоростью объекта и угловой скоростью настраиваемой модели, график 2 – аналогичную разницу по ускорениям. Видно, что спустя всего 5 секунд ошибка идентификации становится близка к 0. Такой временной интервал вполне приемлем для практики.

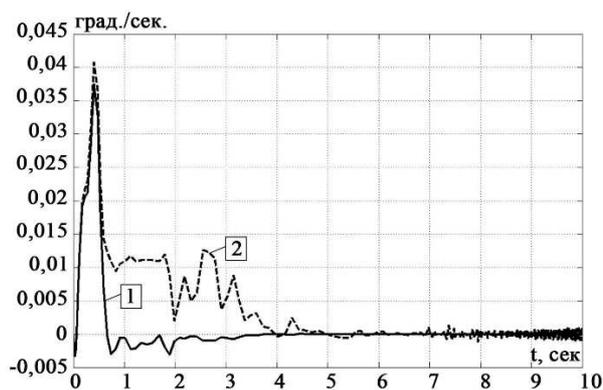


Рис. 6. Результаты идентификации модели движения судна

Уточнённая модель судна используется для корректировки (перенастройки) параметров ПИД – регулятора. Его реализация с актуальными значениями гарантирует устойчивость и повышает качество управления.

В целом результаты моделирования демонстрируют конструктивность предложенной интегрированной схемы системы управления судном.

**Заключение.** При реализации системы управления судном параметры регулятора учитывают известные динамические характеристики судна. Со временем эти характеристики могут заметно изменяться (обрастание, деформация корпуса,

изменение загрузки и т.п.), что, в свою очередь, существенно сказывается на качестве управления. Система управления должна быть либо адаптивной, способной подстраиваться под измененные условия, либо иметь возможность корректировки параметров управления вручную.

В работе предложена система управления судном с использованием классического ПИД-регулятора. Реализован алгоритм адаптивной идентификации параметров системы управления на основе градиентного подхода для модели Номото 2-го порядка. Описанная параметрическая идентификация может выполняться как в режиме реального времени, так и с использованием предварительно сохраненных данных (offline). Для оценки степени изменения параметров математической модели судна процесс идентификации может быть проведён при различных условиях. Наилучшие результаты даёт активное маневрирование судна, например, движение типа «зигзаг» с интенсивной перекладкой пера руля.

Результаты работы ориентированы на расширение функциональности и повышение качества работы систем управления судном.

1. Дмитриев В.И., Каретников В.В. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2017. № 6. С. 1149–1158.
2. Васьков А.С., Мироненко А.А. Управление скоростью движения судна по программной траектории // Эксплуатация морского транспорта. 2015. №3. С. 24–32.
3. Мироненко А.А. Модель программного движения судна в стеснённых водах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. №2. С. 65–70.
4. Лукомский Ю.А., Корчанов В.М. Управление морскими подвижными объектами. СПб.: Элмор, 1996. 318 с.
5. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
6. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
7. 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. адм. С.О. Макарова. 2015. №2. С. 24–31.
8. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечёткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. №11. С. 36–42.
9. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Иваненко Ю.С. Оценка опасности движения на акватории по данным автоматической идентификационной системы // Транспорт: наука, техника, управление. 2017. №10. С. 41–46.
10. Робастный подход к построению систем управления курсом судна / А.А. Дыда, П.А. Дыда, Е.Б. Осокина и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №2. С. 141–145.
11. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука. 1990. 296 с.
12. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука. 1981. 448 с.
13. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID-controller tuning rules. Dublin Institute of Technology, 2009.

### Транслитерация

1. Dmitriev V.I., Karetnikov V.V. Metody obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya pri vnedrenii bespilotnyh tekhnologij // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. 2017. №6. P. 1149–1158.
2. Vas'kov A.S., Mironenko A.A. Upravlenie skorost'yu dvizheniya sudna po programmnoj traektorii // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2015. № 3. P. 24–32.
3. Mironenko A.A. Model' programmnoho dvizheniya sudna v stesnyonnyh vodah // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. № 2. P. 65–70.
4. Lukomskij YU.A., Korchanov V.M. Upravlenie morskimi podvizhnymi ob"ektami. –SPb.: Elmor, 1996. 318 p.
5. Lukomskij YU.A., CHugunov V.S. Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi ob"ektami. L.: Sudostroenie, 1988. 272 p.
6. Vagushchenko L.L., Cymbal N.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna. 3-e izd., pererab. i dop. Odessa: Feniks, 2007. 328 p.
7. Osokina E.B., Os'kin D.A., Dyda A.A. Adaptivnaya identifikatsiya parametrov sudna na osnove prostyh modelej // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova. 2015. № 2. P. 24–31.
8. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S. Nechytokaya sistema raspoznavaniya opasnogo sblizheniya sudov na morskikh akvatoriyah // Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij. 2014. № 11. P. 36–42.
9. Grinyak V.M., Devyatisil'nyj A.S., Ivanenko YU.S. Ocenka opasnosti dvizheniya na akvatorii po dannym avtomaticheskoy identifikacionnoj sistemy // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. 2017. № 10. P. 41–46.
10. Robastnyj podhod k postroeniyu sistem upravleniya kursom sudna / A.A. Dyda, P.A. Dyda, E.B. Osokina i dr. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. № 2. S. 141–145.
11. Fradkov A.L. Adaptivnoe upravlenie v slozhnyh sistemah: bespoiskovye metody. M.: Nauka. 1990. 296 p.
12. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi ob"ektami. M.: Nauka. 1981. 448 p.

© В.М. Гриняк, 2019

© С.С. Пашин, 2019

**Для цитирования:** Гриняк В.М., Пашин С.С. Управление движением судна по программной траектории при параметрической неопределенности с использованием ПИД-регулятора // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. Т. 11, № 2. С. 102–112.

**For citation:** Grinyak V.M., Pashin S.S. Using PID-controller for ship course control under parametric uncertainty, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2019, Vol. 11, №2, pp. 102–112.

DOI [dx.doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/102-112](https://doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/102-112)

Дата поступления: 06.05.2019.