

УДК 685

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi67.188>

## **Системы управления курсом судна с переключаемыми регуляторами**

**А.А. Дыда<sup>1</sup>**

**Нгуен Ван Тхань<sup>1</sup>**

**К.Н. Чумакова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Морской Государственный университет имени адм. Г. И. Невельского,  
г. Владивосток, Россия*

**Аннотация.** Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения качества процессов управления движением судна по курсу путем комбинирования отдельных типовых регуляторов. Из известных научных направлений, посвященных решаемой задаче, наиболее близким является теория систем с переменной структурой, в котором за счет переключений достигаются уникальные полезные свойства, которыми не обладают отдельные переключаемые структуры. Статья посвящена подходу к построению системы управления курсом судна, который основан на принципе переключения регуляторов во время переходного процесса. Это позволяет улучшить качество процессов управления в системе за счет использования особенностей отдельных регуляторов. В частности, применение принципа переключения позволило заметно повысить быстродействие системы в сравнении с системами без переключения и обеспечить желаемый монотонный характер процесса управления. Предложенный подход иллюстрируется на основе переключаемых П-регуляторов. Приводятся и обсуждаются результаты моделирования разработанной системы управления курсом судна.

**Ключевые слова:** управление курсом судна, переключаемый регулятор, процесс управления, математическая модель, компьютерное моделирование, монотонный процесс, переключение, быстродействие системы, системы с переменной структурой.

## **Vessel heading control systems with switchable regulators**

**Alexander A. Dyda<sup>1</sup>**

**Nguyen Van Thanh<sup>1</sup>**

**Ksenya N., Chumakova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Maritime State University named after Admiral Nevelskoy, Vladivostok, Russia*

**Abstract.** The purpose of this work is to study the possibilities of improving the quality of the processes of controlling the movement of the vessel along the course by combining individual standard controllers. Among the known scientific directions devoted to the problem being solved, the closest is the theory of systems with variable structure, in which, due to switching, a unique useful property is achieved, which are not possessed by individual switched structures. The article is devoted to the approach to the construction of the ship course control system, which is based on the principle of switching regulators during the transient process. This makes it possible to improve the quality of control processes in the system by using the features of individual regulators, in particular, the application of the switching principle made it possible to significantly increase the speed of the system in comparison with systems without switching and ensure the desired monotonic nature of the control process. The proposed approach is illustrated based on switchable S-controllers. The results of modeling the developed ship course control system are presented and discussed.

**Keywords:** ship course control, switchable regulator, control process, mathematical model, computer simulation, monotonic process, switching, system speed, variable structure systems.

**Введение**

В системах управления движением судна широкое практическое применение получили типовые линейные регуляторы. К их числу относятся пропорциональные (П), пропорционально-дифференциальные (ПД), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [4,13,16,21,25]. Естественно, что свое практическое применение получили и другие варианты линейных регуляторов, а также принципиально отличающиеся от линейных типы регуляторов, такие как адаптивные, робастные, нелинейные, нейросетевые и другие [5].

Типовым линейным регуляторам систем управления движением судна, в частности, по курсу, присущи как определённые достоинства, так и недостатки [1,5,7,9,12,23,20,19,15,22,24]. Очевидным достоинством типовых линейных регуляторов является простота их технической реализации и алгоритма управления в сравнении с другими решениями [6]. Недостатки их связаны с особенностями работы систем, в частности, курсом судна в условиях действия ветро-волновых возмущений [2,3,11].

В настоящей работе исследуется возможность повышения качества систем управления курсом судна на основе принципа переключения регуляторов [18,17,14]. Предлагаемый подход иллюстрируется на примере простой системы управления курсом судна с переключаемыми П-регуляторами, и, очевидно, может быть распространён на другие виды систем управления и регуляторов.

**Применение принципа переключения регуляторов в системе управления**

Рассмотрим простую систему управления курсом судна с П-регулятором (рис. 1) [8]. На структурной схеме использованы следующие обозначения:  $w_c(s)$  – передаточная функция судна по угловой скорости;  $w_p(s)$  – передаточная функция рулевой машины;  $F$  – нелинейный блок для учета ограничения угла поворота руля судна;  $K_p$  – коэффициент передачи П-регулятора.

Передаточные функции судна и рулевой машины соответственно имеют вид:

$$w_c(s) = \frac{K_c}{T_c s + 1} \tag{1}$$

$$w_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1} \tag{2}$$

Первая из них соответствует так называемой модели Номото 1 порядка.

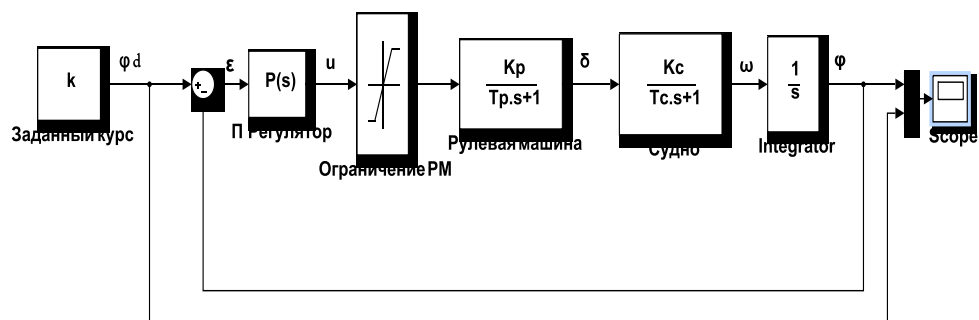


Рис. 1. Схема системы управления курсом судна с П-регулятором  
 Fig. 1. Diagram of a ship's course control system with a S-controller

На рис. 1 использованы следующие обозначения переменных:  $\varphi_d, \varphi$  – заданный курс судна и его фактическое значение соответственно;  $\omega$  – угловая скорость судна (скорость рысканья);  $\delta$  – угол перекладки руля;  $u$  – сигнал управления (выход регулятора);  $\varepsilon$  – сигнал ошибки (рассогласования).

Выберем конкретные параметры модели судна:  $K_s = 0,2$ ,  $T_s = 10$  с,  $K_r = 1$ ,  $T_r = 0,5$  с.,  $\varphi_z = 10^\circ$ . Ограничение рулевой машины:  $[-35^\circ, 35^\circ]$ .

Коэффициент передачи (усиления) П-регулятора при известных параметрах в (1) и (2) выбирается из условий устойчивости системы управления курсом судна (рис. 1).

Анализ показывает, что большим значением коэффициента усиления П-регулятора соответствуют переходные процессы, протекающие с высокой скоростью и имеющие сильно выраженный колебательный характер. Очевидно, что такой характер процессов управления в системе приводит к интенсивной работе рулевой машины, что нежелательно в связи с ускоренным износом ее механизмов.

На рисунках 2-3 приведены примеры процессов, протекающих в системе при большом коэффициенте передачи П-регулятора.

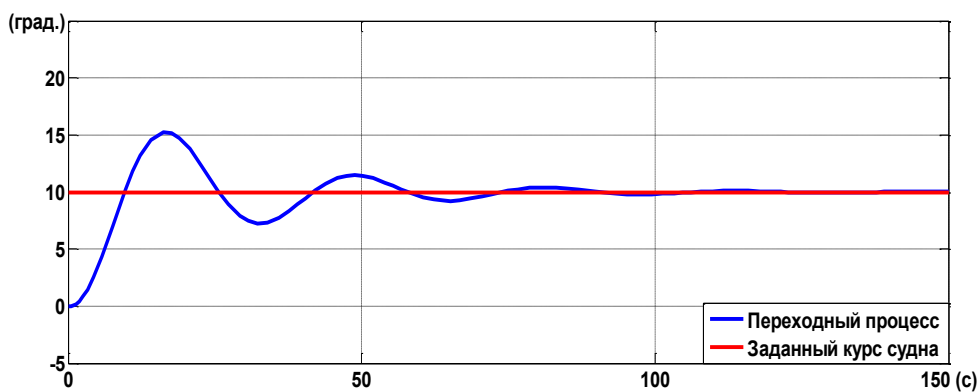


Рис. 2. Переходный процесс системы управления курсом судна с П регулятором при  $K_p = 2$   
 Fig. 2. Transient process of the ship's course control system with S regulator at  $K_p = 2$

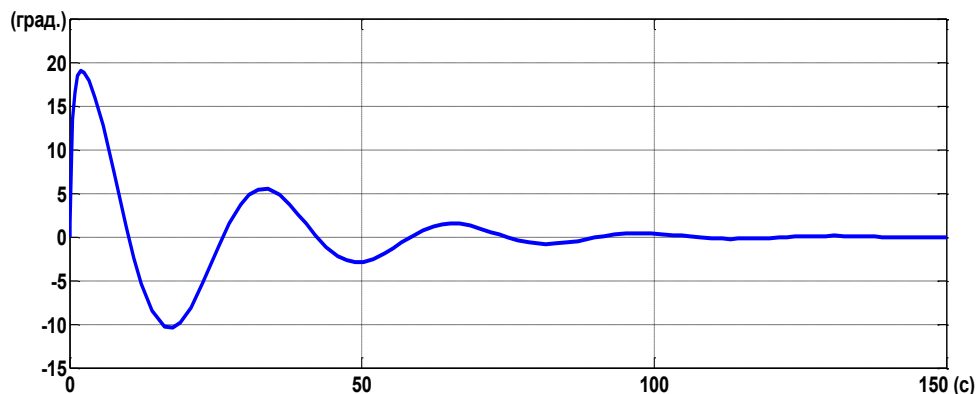


Рис. 3. Угол перекладки руля судна при  $K_p = 2$   
 Fig. 3. The angle of the ship's rudder shift at  $K_p = 2$

Для управления курсом судна желательным является монотонный характер переходного процесса, при котором обеспечивается плавность процесса управления, отсутствие перерегулирования и благоприятный режим работы рулевой машины. На основе математического моделирования системы управления курсом судна при

заданных параметрах был определен коэффициент передачи П-регулятора  $K_p=0,15$ , при котором процесс управления имел монотонный характер при максимальном быстродействии.

Результаты моделирования системы управления курсом судна при  $K_p=0,15$  приведены на рисунках 4-5.

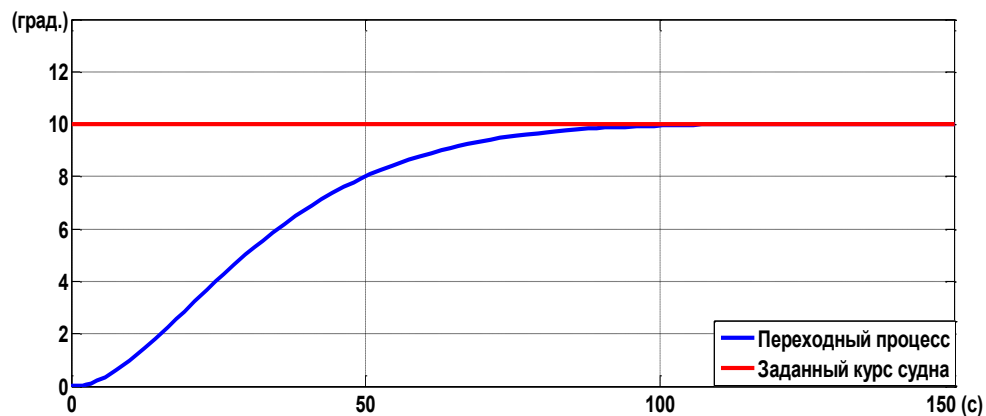


Рис. 4. Переходный процесс системы управления курсом судна с П регулятором при  $K_p = 0,15$

Fig. 4. Transient process of the ship's course control system with S controller at  $K_p = 0.15$

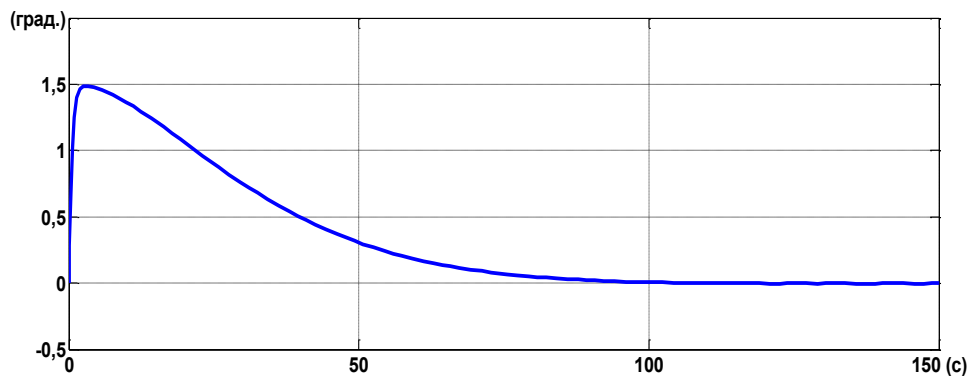


Рис. 5. Угол перекадки руля судна при  $K_p = 0,15$

Fig. 5. The angle of the ship's rudder shift at  $K_p = 0.15$

Рассмотрим теперь возможность объединения полезных свойств П-регуляторов с различными коэффициентами передачи для улучшения качества процессов в системе управления курсом судна.

На рис. 6 приведена схема системы управления курсом судна, в которой реализуется переключение коэффициента усиления П-регулятора. Такие регуляторы далее будем обозначать как  $\Pi_1/\Pi_2$ . Переключение выполняется с помощью

логических блоков при условии, что абсолютная величина сигнала рассогласования  $\varepsilon(t)$  становится меньше заданного уровня «с».

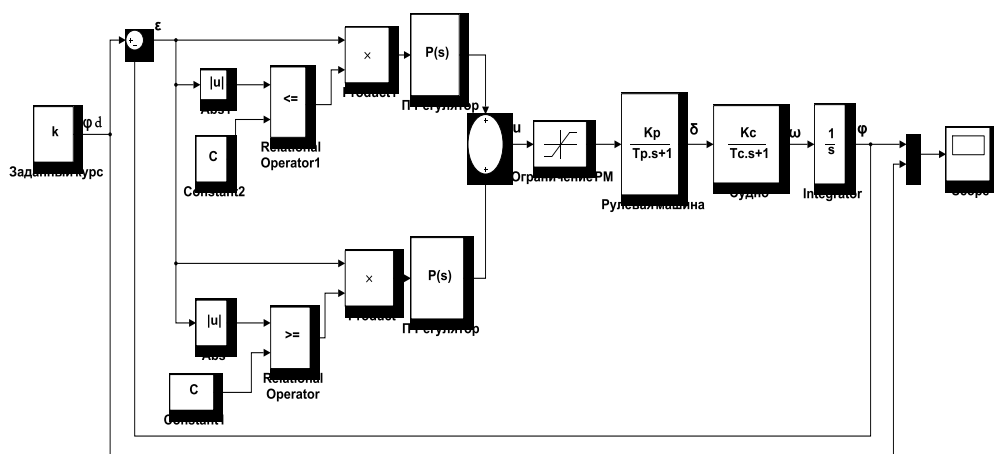


Рис. 6. Система управления курсом судна с переключаемыми П1/П2 регуляторами  
 Fig. 6. Vessel heading control system with switchable S1 / S2 controllers

Результаты математического моделирования системы управления курсом судна приведены на рисунках 7-8. Анализ полученных графиков показывает, что при коэффициенте передачи регулятора  $K_p = 2$ , переходный процесс на начальной фазе протекает с высокой скоростью и время первого достижения заданного курса равно почти 10с, перерегулирование достаточно велико и равно примерно 50% от требуемого значения, а время переходного процесса составляет около 70с. Максимальный угол перекладки руля  $19^\circ$ .

При коэффициенте передачи регулятора  $K_p=0,15$  время переходного процесса составляет примерно 74с и перерегулирование отсутствует. Максимальный угол перекладки руля  $1,5^\circ$ .

При использовании переключаемых П1/П2 регуляторов время переходного процесса составляет 39с, перерегулирование равно 2%. Максимальный угол перекладки руля  $19^\circ$ .

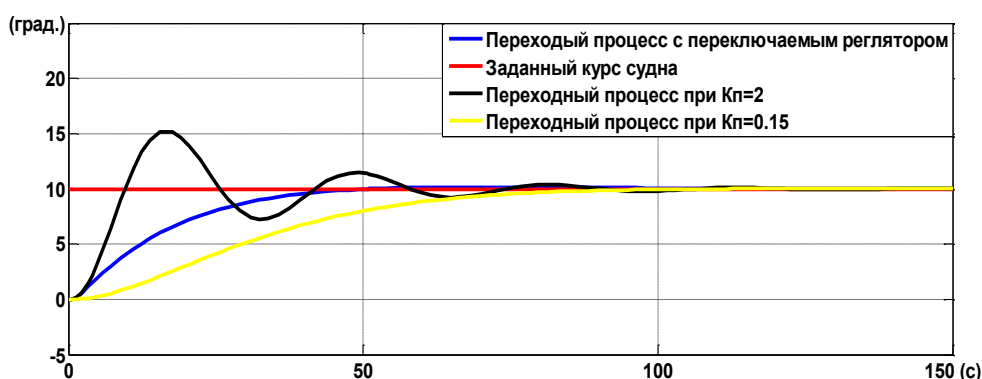


Рис. 7. Переходные процессы в системе управления курсом судна при различных регуляторах  
 Fig. 7. Transient processes in the ship's course control system with different controllers

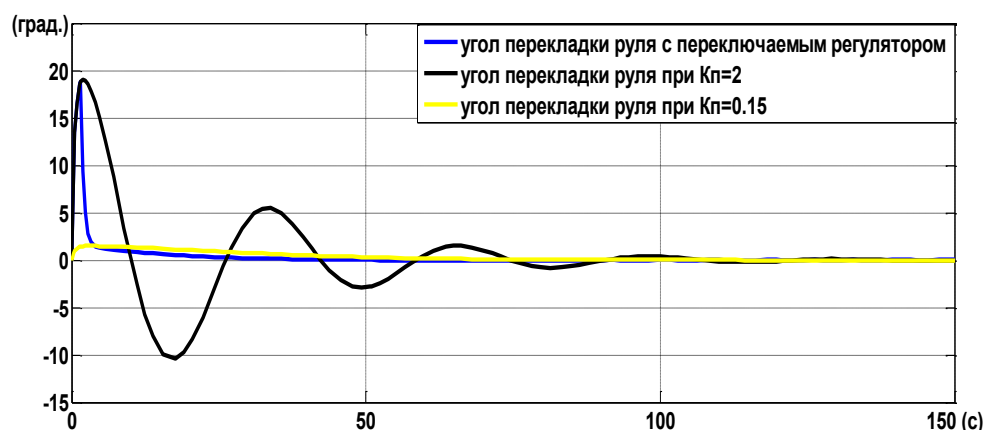


Рис. 8. Углы перекладки руля судна

Fig. 8. Ship rudder angles

Анализ полученных графиков показывает, что применение П-регулятора с большим коэффициентом усиления позволяет обеспечить высокую скорость переходного процесса на его начальной фазе. На финальной стадии переходному процессу обеспечивается монотонный характер за счет переключения на П-регулятор с меньшим коэффициентом передачи.

Приведенные результаты моделирования показывают, что использование переключаемого П1/П2 регулятора в конкретном случае позволило уменьшить время переходного процесса в 1,8 раза в сравнении с П-регулятором при  $K_p=2$  и в 1,9 раза – для  $K_p = 0,15$ . При этом сохранился желаемый монотонный характер быстрого переходного процесса.

Анализ также показывает, что при использовании П1/П2-регулятора условия работы рулевой машины являются существенно более благоприятными в сравнении с системой, имеющей П-регулятор с большим коэффициентом передачи ( $K_p=2$ ).

Следует отметить, что на эффективность применения П1/П2-регуляторов заметное влияние оказывает нелинейный характер системы управления курсом судна, обусловленный ограничением угла перекладки руля, а также выбор константы «с», определяющие условия переключения в логическом блоке регулятора.

### Заключение

Таким образом, применение принципа переключения позволяет в значительной степени нейтрализовать недостатки, свойственные системам управления с фиксированным регулятором. В рассматриваемом случае к таким недостаткам относятся большое перерегулирование и существенная колебательность (для П-регулятора с высоким коэффициентом усиления), а также низкое быстродействие (для П-регулятора с малым коэффициентом усиления).

Построенная же система управления курсом судна сохраняет полезные свойства двух отдельных систем – высокое быстродействие и монотонность переходных процессов.

Исследованная система управления курсом судна с переключаемыми П-регуляторами может быть отнесена к классу систем с переменной структурой, обладающих рядом уникальных свойств [10]. Представляется целесообразным дальнейшее изучение систем управления с переключаемыми типовым и другими регуляторами, в том числе, с учетом влияния внешней водной среды на движения судна.

**Список литературы**

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления [Текст]/ В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2007. – 752 с.
2. Вагущенко, Л.Л. Системы автоматического управления движением судна [Текст]/ Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цымбал. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.
3. Дёмин С.И., Жуков Е.И., Кубачев Н.А. Управление судном: Учеб. Для вузов. – М.: Транспорт, 1991. – 359 с.
4. Денисенко В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации, часть 1 /Денисенко В. // СТА Современные Технологии Автоматизации. – 2006. – №4. – С. 66 – 74
5. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой [Текст]/ С.В. Емельянов. – М.: Наука, 1967. – 336 с.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
7. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М.: Издательство МЭИ, 2004. — 400 с.
8. Сирота А.А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в Matlab: учеб. пособие. – СПб.: БХВ - Петербург, 2016. – 384 с.: ил. – (Учебное пособие).
9. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
10. Уткин В.И. Скользящие режимы с переменной структурой [Текст]/ В.И. Уткин. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
11. Шарлай Г.Н. Управление морским судном: учебное пособие/ Г.Н.Шарлай. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. – 543с.
12. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Trans. on Control Systems Technology. July 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
13. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. — ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006. — 460 p.
14. Hodel A.S., Hall C.E. Variable\_structure PID control to prevent integrator windup // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2001. Vol. 48. No. 2. P. 442-451.
15. Jing Chung Shen, Huann Keng Chiang. PID tuning rules for second order systems // Control Conference, 2004 (5th Asian), 20-23 July 2004. Vol. 1. P. 472-477.
16. Karimi A., Garcia D., Longchamp R. PID controller tuning using Bode's integrals // IEEE Trans. on Control Systems Technology. Nov. 2003. Vol. 11. No. 6. P. 812-821.
17. Keel L.H., Rego J.I., Bhattacharyya S.P. A new approach to digital PID controller design // IEEE Trans. on Automatic Control. April 2003. Vol. 48. No. 4. P. 687-692.
18. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. P. 42-54.
19. Moradi M.H. New techniques for PID controller design // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications (CCA 2003), 23\_25 June 2003. Vol. 2. P. 903-908.
20. Obika M., Yamamoto T. An evolutionary design of robust PID controllers // Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, 29 July \_ 1 Aug. 2005. Vol. 1. P. 101-106.
21. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. P. 15-19.
22. Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. New results on the synthesis Of PID controllers // IEEE Trans. on Automatic Control. Feb. 2002. Vol. 47. No. 2. P. 241-252.
23. Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. On the stability and controller robustness of some popular PID tuning rules // IEEE Trans. on Automatic Control. Sept. 2003. Vol. 48. No. 9. P. 1638-1641.
24. Skoczowski S., Domek S., Pietrusewicz K., Broel\_Plater B. A method for improving the robustness of PID control // IEEE Trans. on Industrial Electronics. Dec. 2005. Vol. 52. No. 6. P. 1669\_1676.
25. Takao K., Yamamoto T., Hinamoto T. Design of a memory\_based selftiming PID controller // 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2004), 14\_17 Dec. 2004. Vol. 2. P. 1598-1603.

### References

1. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of automatic control [Text] / V.A. Besekersky, E.P. Popov. - SPb.: Professiya, 2007. -- 752 p.
2. Vagushchenko, L.L. Systems of automatic control of vessel movement [Text] / LL. Vagushchenko, N.N. Tsymbal. - Odessa: Latstar, 2002. -- 310 p.
3. Demin S.I., Zhukov E.I., Kubachev N.A. Ship management: Proc. For universities. - M.: Transport, 1991. -- 359 p.
4. Denisenko V. PID - controllers: principles of construction and modification, part 1 / Denisenko V. // STA Modern Automation Technologies. - 2006. - No. 4. - P. 66 - 74
5. Emelyanov S.V. Automatic control systems with variable structure [Text] / S.V. Emelyanov. - Moscow: Nauka, 1967. -- 336 p.
6. Iserman R. Digital control systems. - M.: Mir, 1984. -- 541 p.
7. Rotach V.Ya. Automatic control theory. - M.: Publishing house MEI, 2004. -- 400 p.
8. Orphan A.A. Methods and algorithms for data analysis and their modeling in Matlab: textbook. allowance. - SPb.: BHV - Petersburg, 2016. -- 384 p. : ill. - (Tutorial).
9. Handbook on the theory of automatic control / Ed. A.A. Krasovskiy. - M.: Nauka, 1987. -- 712 p.
10. Utkin V.I. Sliding modes with variable structure [Text] / V.I. Utkin. - Moscow: Nauka, 1974. -- 272 p.
11. Sharlai G.N. Management of a sea vessel: a study guide / G.N. Sharlay. - Vladivostok: Mor. state un-t, 2011. - 543p.
12. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Trans. on Control Systems Technology. July 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
13. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. — ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006. — 460 p.
14. Hodel A.S., Hall C.E. Variable structure PID control to prevent integrator windup // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2001. Vol. 48. No. 2. P. 442-451.
15. Jing\_Chung Shen, Huann\_Keng Chiang. PID tuning rules for second order systems // Control Conference, 2004 (5th Asian), 20-23 July 2004. Vol. 1. P. 472-477.
16. Karimi A., Garcia D., Longchamp R. PID controller tuning using Bode's integrals // IEEE Trans. on Control Systems Technology. Nov. 2003. Vol. 11. No. 6. P. 812-821.
17. Keel L.H., Rego J.I., Bhattacharyya S.P. A new approach to digital PID controller design // IEEE Trans. on Automatic Control. April 2003. Vol. 48. No. 4. P. 687-692.
18. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. P. 42-54.
19. Moradi M.H. New techniques for PID controller design // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications (CCA 2003), 23\_25 June 2003. Vol. 2. P. 903-908.
20. Obika M., Yamamoto T. An evolutionary design of robust PID controllers // Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, 29 July\_1 Aug. 2005. Vol. 1. P. 101-106.
21. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. P. 15-19.
22. Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. New results on the synthesis Of PID controllers // IEEE Trans. on Automatic Control. Feb. 2002. Vol. 47. No. 2. P. 241-252.
23. Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.P. On the stability and controller robustness of some popular PID tuning rules // IEEE Trans. on Automatic Control. Sept. 2003. Vol. 48. No. 9. P. 1638-1641.
24. Skoczowski S., Domek S., Pietruszewicz K., Broel Plater B. A method for improving the robustness of PID control // IEEE Trans. on Industrial Electronics. Dec. 2005. Vol. 52. No. 6. P. 1669\_1676.
25. Takao K., Yamamoto T., Hinamoto T. Design of a memory\_based selftiming PID controller // 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2004), 14\_17 Dec. 2004. Vol. 2. P. 1598-1603.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Дыда Александр Александрович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматических и информационных систем, «Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а,

**Alexander A. Dyda**, Doctor in Engineering Science, Professor of the Department of Automatic and Information Systems, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059, e-mail:adyda@mail.ru

**Нгуен Ван Тхань**, аспирант, «Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: Thanhnv.hvhq@gmail.com

**Nguyen Van Thanh**, graduate student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059, e-mail: Thanhnv.hvhq@gmail.com

**Чумакова Ксения Николаевна**, аспирант, «Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского» (ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»), 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: ksushechka\_1991@mail.ru

**Ksenya N. Chumakova**, graduate student, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, 50-a, st. Verkhneportovaya, Vladivostok, 690059, e-mail: ksushechka\_1991@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.02.2021; опубликована онлайн 15.06.2021  
Received 19.02.2021; published online 15.06.2021