

5. Васьков, А.С. Математические основы судовождения. Лабораторный практикум: уч. пособие [Текст]/ А.С. Васьков, А.А. Мироненко.– М.: Из-во Юрайт, 2021.– 179 с.
6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц [Текст].– М.: Наука, 1988.– 552 с.
7. Голованов, Н.Н. Геометрическое моделирование [Текст].– М.: Из-во Физ.-мат. лит-ры, 2002.– 472 с.
8. ГОСТ 32453–2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [Текст].– М.: Стандартинформ, 2017.– 23 с.
9. Корнев Г.В. Цель и приспособляемость движения [Текст].– М.: Наука, 1974.– 528 с.
10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст]/ Г.Корн, Т.Корн.– М.: Наука, 1984.– 831 с.
11. Ляпунов, А.М. Лекции по теоретической механике [Текст].– Киев: Наук. думка, 1982.– 632 с.
12. Маркеев, А.П. Теоретическая механика [Текст].– М.: ЧеРо, 1999.– 572 с.
13. Мироненко, А.А. Прототип судна-робота [Текст]// Эксплуатация морского транспорта.– 2018.– № 2(87).– С. 46-52.
14. Митюков, В.В. Методика преобразования координат при моделировании движения твердого тела [Текст]/ В.В. Митюков, И.В. Извольский// Автоматизация процессов управления.– 2010.– №4(22).– С.16-20.
15. Практическое кораблевождение: для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Кн.1 [Текст]/ под ред. А.П. Михайловского.– Л.: ГУНиО МО, 1889. – 896 с.
16. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики [Текст]/ Д. Роджерс, Дж. Адаме.– М.: Мир, 2001.– 604 с.
17. Скрышник, О.Н. Системы координат и координатные преобразования для задач аэронавигации [Текст]// Научный Вестник МГТУ ГА, 2017.– Т.20.– №04.– С.88-96.
18. Сорокин А.И. Морская картография [Текст].– Л.: ГУНИО МО, 1985.– 254 с.
3. Vas'kov, A.S. Matematicheskoe obespechenie processov dvizheniya sistemy sudno – zona navigacionnoj bezopasnosti [Tekst].– M.: Mortekhinformreklama, 1994.– 89 s.
4. Vas'kov, A.S. Metodologicheskie osnovy upravleniya dvizheniem sudna i konfiguraciej zony navigacionnoj bezopasnosti [Tekst]/ Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d.t.n. (05.22.16).– SPb.: GMA im. adm. S.O.Makarova, 1998.– 48 s.
5. Vas'kov, A.S. Matematicheskie osnovy sudovozhdeniya. Laboratornyj praktikum: Uch. posobie [Tekst]/ A.S.Vas'kov, A.A.Mironenko.– M.: Iz-vo YUrajt, 2021.– 179 s.
6. Gantmaher F.R. Teoriya matric [Tekst].– M.: Nauka, 1988.– 552 s.
7. Golovanov, N.N. Geometricheskoe modelirovanie [Tekst].– M.: Iz-vo Fiz.-mat. lit-ry, 2002.– 472 s.
8. GOST 32453–2017. Global'naya navigacionnaya sputnikovaya sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyaemyh toчек [Tekst].– M.: Standartinform, 2017.– 23 s.
9. Korenev G.V. Cel' i prisposoblyaemost' dvizheniya [Tekst].– M.: Nauka, 1974.– 528 s.
10. Korn, G. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Tekst]/ G.Korn, T.Korn.– M.: Nauka, 1984.– 831 s.
11. Lyapunov, A.M. Lekcii po teoreticheskoj mekhanike [Tekst].– Kiev: Nauk. dumka, 1982.– 632 s.
12. Markeev, A.P. Teoreticheskaya mekhanika [Tekst].– M.: CHERo, 1999.– 572 s.
13. Mironenko, A.A. Prototip sudna-robota [Tekst]/ Ekspuataciya morskogo transporta.– 2018.– № 2(87).– S. 46 – 52.
14. Mityukov, V.V. Metodika preobrazovaniya koordinat pri modelirovanii dvizheniya tverdogo tela [Tekst]/ V.V.Mityukov, I.V.Izvol'skij// Avtomatizaciya processov upravleniya, 2010.– №4(22).– S.16 – 20.
15. Prakticheskoe korablevozhdenie: dlya komandirov korablej, shturmanov i vahtennyh oficerov. Kn.1 [Tekst]/ Pod red. A.P. Mihajlovskogo.– L.: GUNIO MO, 1889. – 896 s.
16. Rodzhers, D. Matematicheskie osnovy mashinnoj grafiki [Tekst]/ D.Rodzhers, Dzh.Adame.– M.: Mir, 2001.– 604 s.
17. Skrypnik, O.N. Sistemy koordinat i koordinatnye preobrazovaniya dlya zadach aeronavigacii [Tekst]/ Nauchnyj Vestnik MGTU GA, 2017.– Т.20.– №04.– S.88 – 96.
18. Sorokin A.I. Morskaya kartografiya [Tekst].–L.: GUNIO MO, 1985.–254 s.

#### References

1. Baranov, YU.K. Navigaciya: Uchebnik [Tekst]/ YU.K.Baranov, M.I.Gavryuk, V.A.Loginovskij, YU.A.Peskov. – SPb.: Lan', 1997. – 512 s.
2. Vasil'ev, A.V. Upravlyaemost' sudov [Tekst].– L.: Sudostroenie, 1989.– 327 s.

УДК 62-523.2

DOI: 10.34046/aumsuomt102/7

### АВТОРУЛЕВОЙ АЗИПОДНОГО СУДНА

*Я.В. Бурьлин кандидат технических наук*

В статье предлагаются методы формирования управляющих воздействий на средства управления судном, оснащенным двумя аzipодными установками и носовым подруливающим устройством. Законы управления судном строятся на иерархически организованных ПИД-принципах с декомпозицией по

типам движения. Носовое подруливающее устройство с одним из азиподом обеспечивают управляемость по поперечному и вращательному движениям. Оставшийся азипод обеспечивает управляемость по продольному движению.

### AUTOPILOT FOR AZIPOD VESSEL

*Y.V. Burylin*

The article considers the methods of formation of control actions on the means of ship control, implemented by two azipod installations and a bow thruster. The ship control laws are based on hierarchically organized PID principles with decomposition by types of movement. A bow thruster with one of the azipods provides lateral and rotational control. The remaining azipod provides longitudinal control.

**Key words:** unmanned vessels, automatic control, e-navigation, dynamic positioning.

В целях развития отечественной инфраструктуры безэкипажного судовождения разрабатывается навигационный комплекс мониторинга и управления движением безэкипажного судна. Проект соответствует плану мероприятий национальной технологической инициативы «Маринет [1, 2, 6]. На данном этапе идет процесс оснащения корпуса прототипа безэкипажного судна средствами управления, соответствующими судам класса DP-2. Разрабатываются системы управления такими судами в дистанционном и автоматическом режимах.

1. Работа в режиме проводки по заданной траектории.

Поскольку в режиме проводки судно, как правило, следует постоянной скоростью с синхронной работой азиподов, а использование носового подруливающего устройство не целесообразно на полных и средних ходах, то закон управления предлагается рассматривать в виде расширенного ПИД регулятора по курсу [3]:

$$\begin{cases} \delta_p = a_{pr}(K_p + \Delta K_\chi - K) + a_{in} \int (K_p + \Delta K_\chi - K) dt + a_d \omega; \\ \Delta K_\chi = b_{pr} \chi + b_{in} \int \chi dt, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K, K_p$  – курсы исполняемый и заданный;

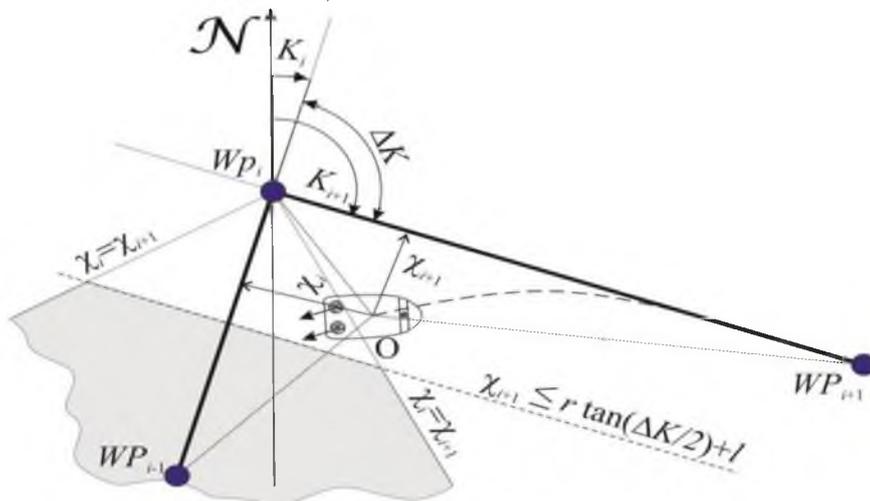


Рисунок 1 – Движение судна по заданной траектории

2. Работа судна в режиме динамического позиционирования.

На рисунке 2 показана схема автоматического перехода судна из позиции с координатами

$\Delta K_\chi$  – поправка к заданному курсу за отклонение от траектории;

$a_{pr}, a_{in}, a_d, b_{pr}, b_{in}$  – коэффициенты;

$\omega, \chi$  – угловая скорость и отклонение от траектории;

$\delta_p$  – заданный угол атаки азиподов.

Судно придерживается текущего плеча траектории, минимизируя отклонение от заданного путевого угла и расстояние до линии пути. Расстояния до текущего и следующего плеч траектории рассчитываются из треугольников  $WP_i WP_i O$  и  $WP_{i+1} WP_i O$ , показанных на рисунке 1, по формуле Герона как их высоты. Переключение управления на следующее плечо траектории происходит при выполнении одного из следующих условий:

$$\begin{cases} \chi_{i+1} \geq \chi_i; \\ \chi_{i+1} \leq r \tan\left(\frac{\Delta K}{2}\right) + l, \end{cases}$$

где  $r, l$  – радиус циркуляции судна при автоматическом изменении курса на заданный угол и длина судна, то есть при выходе судна из заштрихованной области.

$\phi_0, \lambda_0$  и курсом  $K_0$ , в заданную позицию с координатами  $\phi_0, \lambda_0$  и курсом  $K_0$  при помощи носового подруливающего устройства ВТ, левого АР и правого АS азиподов. Один из азиподов совместно с

подруливающим устройством обеспечивает одновременное поперечное перемещение и вращение вокруг вертикальной оси судна. Второй аzipод обеспечивает продольное движение вдоль главной оси судна. Такое распределение функциональных ролей средств управления всегда обеспечивает достижения цели управления в режиме динамического позиционирования при допустимых погодных условиях.

Учитывая, что направления осей вращения винтов аzipодов и подруливающего устройства фиксированы: один аzipод в диаметральной плоскости, второй аzipод и подруливающее устройство перпендикулярно диаметральной плоскости, управление будет заключаться в изменении частоты оборотов винтов всех средств управления [4, 5].

$$\begin{aligned} \eta_{AP} &= p_{APK} \left( \Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right) + p_{APx} \left( x + d_x \frac{dx}{dt} + i_x \int x dt \right); \\ \eta_{AS} &= p_{ASy} \left( y + d_y \frac{dy}{dt} + i_y \int y dt \right); \\ \eta_{BT} &= p_{BTK} \left( \Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right) + p_{BTx} \left( x + d_x \frac{dx}{dt} + i_x \int x dt \right); \\ x &= \Delta \sigma \sin(K - \gamma); \quad y = \Delta \sigma \cos(K - \gamma); \quad \Delta K = K_o - K, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\eta_{AP}$ ,  $\eta_{AS}$ ,  $\eta_{BT}$  – управляющие воздействия на левый, правый аzipоды и подруливающее устройство по частоте оборотов винтов.

$p_{APK}$ ,  $d_K$ ,  $i_K$ ,  $p_{APx}$ ,  $p_{ASy}$ ,  $d_y$ ,  $i_y$ ,  $p_{BTK}$ ,  $p_{BTx}$ ,  $d_x$ ,  $i_x$  – коэффициенты,

$\omega$  – угловая скорость судна,

$x$ ,  $y$  – продольное и поперечное отклонения текущих координат судна от заданных в системе координат, связанной с главными осями судна,

$\gamma$  – путевого угла из текущей позиции в заданную

$\Delta \sigma$  – расстояние между текущей и заданной позициями по дуге большого круга.

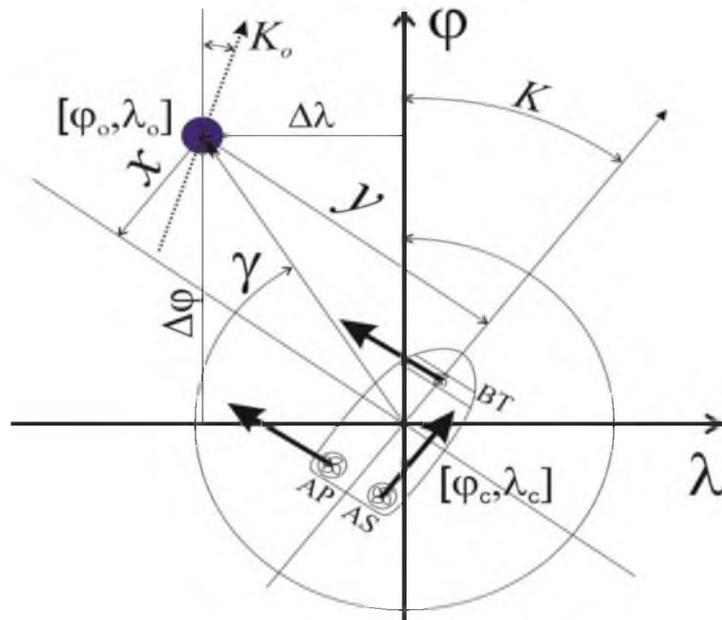


Рисунок 2 – Удержание судна в ориентированной позиции

Расстояние между текущей и заданной позициями рассчитывается по формуле, обеспечивающей максимальную точность при компьютерных операциях с плавающей точкой [3]:

$$\Delta \sigma = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_o - \varphi_c}{2} \right) + \cos \varphi_o \cos \varphi_c \sin^2 \left( \frac{\lambda_o - \lambda_c}{2} \right)}, \quad (3)$$

где  $\varphi_o, \varphi_c$ ,  $\lambda_o, \lambda_c$  – широты и долготы заданного и текущего местоположений судна.

Путевого угла из текущей позиции в заданную, рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctan \left[ \Delta \lambda \left( \ln \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_c}{2} \right) \left( \frac{1 - e \sin \varphi_c}{1 + e \sin \varphi_c} \right)^{\frac{e}{2}} \right] - \ln \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_o}{2} \right) \left( \frac{1 - e \sin \varphi_o}{1 + e \sin \varphi_o} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \right)^{-1} \right]; \\ \Delta \lambda &= \begin{cases} \lambda_c - \lambda_o & \left| \lambda_c - \lambda_o \right| \leq \pi; \\ 2\pi + \lambda_c - \lambda_o & \lambda_c - \lambda_o < -\pi; \\ \lambda_c - \lambda_o - 2\pi & \lambda_c - \lambda_o > \pi; \end{cases} \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  – длины большой и малой полуосей земного эллипсоида.

### 3. Работа в режиме швартовки.

Конечным пунктом заданной программной траектории является поворотный круг (рисунок 3), в котором судно может безопасно развернуться параллельно причалу, после чего продолжить движение к причалу лагом. Таким образом работа судна в режиме автоматической швартовки является комбинацией режимов проводки и динамического позиционирования. Подход судна к причалу разбивается на три этапа:

- следование до поворотного круга по принципам (1),
- раскантовка судна параллельно причалу по принципам (2),
- параллельное смещение к причалу до его касания по принципам (2).

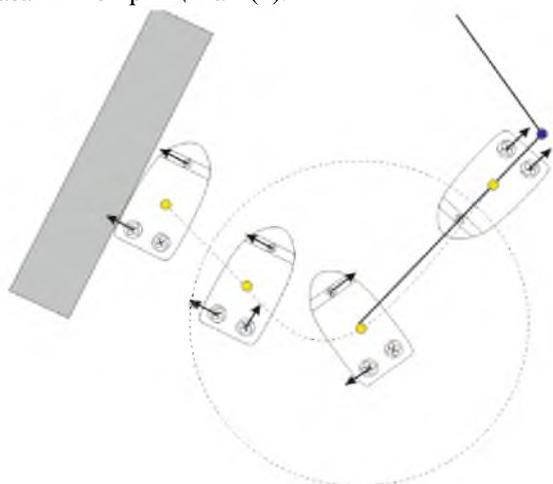


Рисунок 3 – Подход судна к причалу в режиме швартовки

#### Литература:

1. Пинский А. С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт РФ.– 2016.– № 4 (65).– С. 50-54.
2. Hagen, J.E. Implementing e-Navigation, 2017. – 203 p.
3. Патент №2021612609 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04 (2006.01), G05В 13/04 (2006.01),

- G08G 3/00 (2006.01). Способ автоматической проводки судна: № 2021611569: заявл. 09.02.2021: опубл.19.02.2021/ Бурьлин Я.В., Кондратьев А.С., Попов А.Н.; заявитель ГМУ. – 4 с.
4. Burylin Y. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. – P. 1–7.
5. Burylin Y. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021).Journal of Physics: Conference Series, 2021. №2061. P. 1–7.
6. The Future of e-Navigation in the North Sea Region. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.accseas.eu/project-information/> (дата обращения 15.03.2020).

#### Reference

1. Pinsky A.S. E-Navigation and unmanned navigation.// Transport RF.– 2016.– No. 4 (65). pp. 50-54.
2. Hagen, J.E. Implementing e-Navigation, 2017. - 203 p.
3. Patent No. 2021612609 Russian Federation, IPC B63H 25/04 (2006.01), G05B 13/04 (2006.01), G08G 3/00 (2006.01). The method of automatic wiring of the vessel: No. 2021611569: Appl. 02/09/2021: publ. 02/19/2021 / Burylin Ya.V., Kondratiev A.S., Popov A.N.; GMU applicant. - 4 s.
4. Burylin Y.. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. No. 2061. – P. 1–7.
5. Burylin Y.. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). Journal of Physics: Conference Series, 2021. No. 2061. P. 1–7.
6. The Future of e-Navigation in the North Sea Region. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.accseas.eu/project-information/> (accessed 03/15/2020).

УДК 656.61

DOI: 10.34046/aumsuomt102/8

## БЛОКЧЕЙН КАК ТЕХНОЛОГИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖДУНАРОДНЫХ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ

*Н.П. Ардельянов, аспирант*

В статье «Блокчейн как технология функциональной устойчивости международных морских операций» показана важная роль морского торгового порта как крупного логистического центра. Проведен сравнительный анализ всех видов транспорта. Ключевые критерии анализа показывают особую значимость морского транспорта в мировой экономике. Исследовано влияние множества факторов,