

Система автоматического управления маломерным судном, оснащенной системой динамического позиционирования



Я. В. Бурелин,
канд. техн. наук, доцент
кафедры судовождения
Государственного морского
университета имени
адмирала Ф. Ф. Ушакова
(ГМУ),



А. Н. Попов,
д-р техн. наук, начальник
факультета эксплуатации
водного транспорта
и судовождения ГМУ,



А. Л. Боран-Кешишьян,
канд. техн. наук,
проректор ГМУ

Технические средства управления судном, навигации, радиокоммуникации и автоматизации судовождения непрерывно развиваются. Однако, несмотря на существенный прогресс в точности определения координат места судна и его кинематических параметров, методы управления движением судна, в том числе автоматического, требуют дальнейшего совершенствования.

В целях развития отечественной инфраструктуры безэкипажного судовождения разрабатывается навигационный комплекс мониторинга и управления движением безэкипажного судна. Проект соответствует плану мероприятий национальной технологической инициативы «Маринет» [1–3].

На базе лаборатории развития безэкипажного судовождения ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова разработано

маломерное судно, оснащенное системой динамического позиционирования (рис. 1). Разрабатываются системы управления такими судами в дистанционном и автоматическом режимах [4–7].

Среди задач и требований, возлагаемых на современные авторулевые, можно выделить следующие:

- удержание судна на курсе (прямой линии пути) с учетом внешних условий;



Рис. 1. Маломерное надводное судно с системой динамического позиционирования

- осуществление поворотов в соответствии с заданными радиусом и/или угловой скоростью поворота;
- удерживание судна на заданном маршруте (траектории) как объединение двух предыдущих задач;
- недопущение снижения надежности системы за счет ее усложнения;
- компенсация случайных внешних управляющих и возмущающих воздействий на звенья системы обратными связями структуры и алгоритмов авторулевого.

В реалиях современного судоходства функционирование систем автоматического управления морскими подвижными объектами (САУ МПО) должно обеспечивать: надежность и точность работы системы в соответствии с требованиями безопасности в данном районе плавания; автоматическую корректировку математической модели, на базе которой строится управление в соответствии с условиями эксплуатации МПО; оптимизацию по заданному критерию настройки параметров управления и математической модели в режиме реального времени. В то же время такие требования к САУ до сих пор остаются недостаточно реализованными.

Работа в режиме проводки по заданной траектории

Поскольку в режиме проводки судно, как правило, следует с постоянной скоростью с синхронной работой аzipодов, а использование носового подруливающего устройства не целесообразно на полных и средних ходах, то закон управления предлагается рассматривать в виде расширенного пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора по курсу [8–11]:

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

где K, K_p — исполняемый и заданный курсы;

ΔK_χ — поправка к заданному курсу за отклонение от траектории;

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

ω, χ — угловая скорость и отклонение от траектории;

δ_p — заданный угол атаки аzipодов.

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 $WP_{i-1}WP_iO$ и $WP_iWP_{i+1}O$ (рис. 2) по формуле Герона как их высоты. Переключение управления на следующее плечо траектории происходит при выполнении одного из 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, т. е. при выходе судна из заштрихованной области.

Работа судна в режиме динамического позиционирования

На рис. 3 показана схема автоматического перехода судна из позиции с координатами φ_c, λ_c и курсом K в заданную позицию с координатами φ_o, λ_o и курсом K_o при помощи носового подруливающего устройства ВТ, левого АР и правого АS аzipодов.

Один из аzipодов совместно с подруливающим устройством обеспечивает одновременное поперечное перемещение и вращение вокруг вертикальной оси судна. Второй аzipод

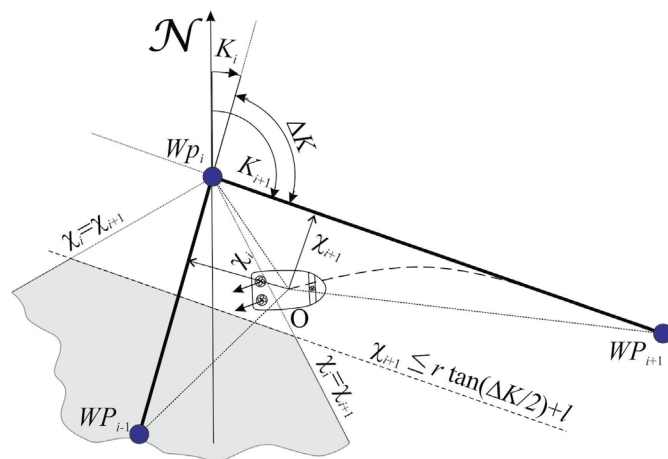


Рис. 2. Движение судна по заданной траектории

обеспечивает продольное движение вдоль его главной оси. Такое распределение функциональных ролей средств управления всегда обеспечит достижение 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 и подруливающее устройство перпендикулярно диаметральной плоскости), управление будет заключаться в изменении частоты оборотов винтов всех средств управления [12]:

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

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

$p_{APK}, d_{KR}, i_{KR}, p_{APx}, d_{Ax}, i_{Ax}, p_{BTK}, d_{BTK}, i_{BTK}, p_{ASy}, d_{Ay}, i_{Ay}$ — коэффициенты;

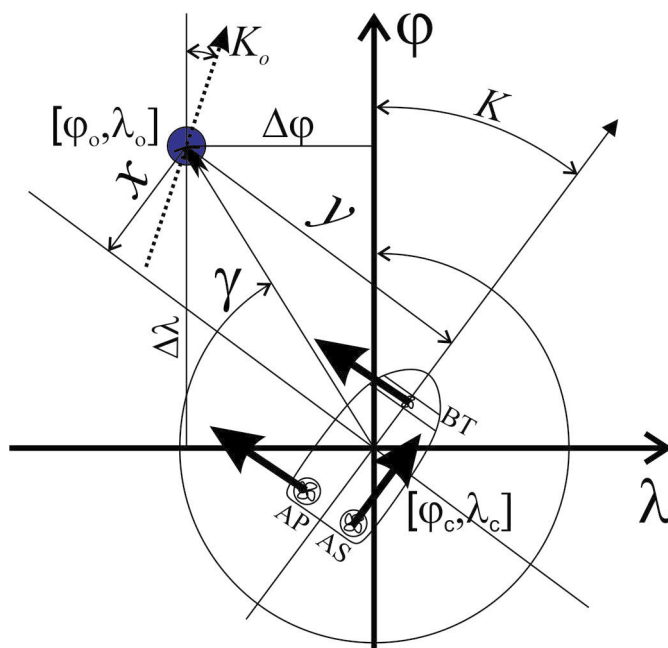


Рис. 3. Удержание судна в ориентированной позиции

ω — угловая скорость судна;

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

γ — путевой угол из текущей позиции в заданную;

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

Расстояние между текущей и заданной позициями рассчитывается по формуле, обеспечивающей максимальную точность при компьютерных операциях с плавающей точкой [12]:

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

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

Путевой угол из текущей позиции в заданную рассчитывается по формулам:

$$\gamma = \arctan \left(\Delta\lambda \left(\ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_c}{2} \right) \left(\frac{1 - e \sin \phi_c}{1 + e \sin \phi_c} \right)^{\frac{e}{2}} \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_o}{2} \right) \left(\frac{1 - e \sin \phi_o}{1 + e \sin \phi_o} \right)^{\frac{e}{2}} \right) \right) \right); \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \begin{cases} \lambda_c - \lambda_o & |\lambda_c - \lambda_o| \leq \pi; \\ 2\pi + \lambda_c - \lambda_o & \lambda_c - \lambda_o < -\pi; \\ \lambda_c - \lambda_o - 2\pi & \lambda_c - \lambda_o > \pi; \end{cases} \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}},$$

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

Работа в режиме швартовки

Конечным пунктом заданной программной траектории является поворотный круг (рис. 4), в котором судно может безопасно развернуться параллельно причалу, после чего продолжить движение к причалу лагом. Таким образом, ра-

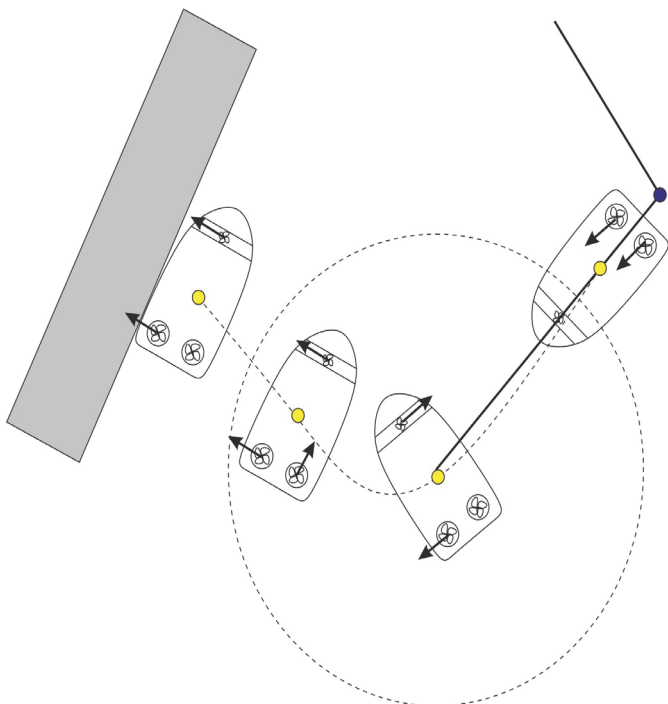


Рис. 4. Подход судна к причалу в режиме швартовки

бота 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).

Заключение

Предложенная система автоматического управления судном, оснащенная средствами управления для решения задач удержания судна на заданном курсе, заданной траектории, в точке, заданной координатами и швартовки к причалу обеспечивает решение поставленных перед судном навигационных задач.

Используемые в качестве регуляторов ПИД алгоритмы обеспечивают надежность и устойчивость управления. Система может быть установлена на маломерные специализированные автономные суда для повышения эффективности портовой инфраструктуры.

Дальнейшие исследования предполагают возможность создания тренажерного центра с управляемыми моделями судов в ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова для отработки навыков и приобретения соответствующих компетенций внешних капитанов безэкипажных морских судов.

Источники

1. Safety and shipping review. Allianz Global Corporate & Specialty SE, 2018. 48 p.
2. Пинский А. С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт РФ. 2016. Т. 4 (65). С. 93–100.
3. Baldauf M., Benedict K. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response // WMU Journal of Maritime Affairs. 2011. Pp. 209–226.
4. Carlson D. F., Fürsterling A. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring // Hardware X. 2019. Vol. 6. Pp. 59–78.
5. Bayat B., Crasta N. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques // Current Opinion in Biotechnology. 2017. Vol. 45. Pp. 76–84.
6. Barbieri L., Cucinotta F. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping. Switzerland, AG: Springer Nature, 2020. Pp. 422–431.
7. Burylin Y. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2061. № 012117.
8. Narkiewicz J., Świętoń G. Autopilot with adaptive vessel modelling // Annual of navigation. 2009. Vol. 15. Pp. 93–100.
9. Патент № RU 2759068 C1. Метод автоматической проводки судна / Бurylin Я. В., Кондратьев А. И., Попов А. Н. Оpubл. 09.11.2021. Бюл. № 31.
10. Бurylin Я. В. Идентификация нелинейной модели движения судна и адаптивное управление по траектории: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новороссийск: НГМА, 2018. С. 24.
11. Kondratyev A. I., Burylin I. V. The method for automatic control of a ship with directional instability // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2061. № 012084.
12. Burylin Y. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2061. № 012074.