

УДК 656. 62.052.4

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ АВТОНОМНЫМ СУДНОМ ДЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОВОРОТОВ

Осокин Игорь Михайлович¹, аспирант

e-mail: abcd1055@mail.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В данной статье предложен алгоритм управления полностью автономным судном для прохождения поворотов. Выполнение маневра поворота разделено на три этапа. Для каждого этапа предложены условия обеспечения перевода автономного судна с одной заданной траектории движения на другую, способы определения момента начала маневрирования и характера перекладки средства управления.

Ключевые слова: алгоритм управления, автономное судно, прямолинейная траектория движения, криволинейная траектория движения, радиус поворота, перекладка средства управления, дистанция упреждения.

CONTROL ALGORITHM OF A MARINE AUTONOMOUS VESSEL FOR TURNING

Igor M. Osokin¹, Doctoral Student

e-mail: abcd1055@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In this paper, a control algorithm is proposed for a fully autonomous ship for turning maneuvers. The execution of the turning maneuver is divided into three stages. For each stage, conditions for ensuring the transfer of an autonomous vessel from one given trajectory to another, methods of determining the moment of maneuvering commencement and the nature of rudder angle determination are proposed.

Keywords: control algorithm, autonomous vessel, rectilinear trajectory, curved trajectory, turning radius, rudder angle, anticipation distance.

Цифровизация транспортных средств является одной из приоритетных целей в области развития транспорта. Данная задача закреплена в Распоряжении Правительства РФ [1]. Кроме прочего под цифровизацией транспортных средств понимается процесс создания и внедрения морских автономных или дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). В 2021 году Правительством РФ был запущен федеральный проект «Автономное судовождение», предполагающий создание автономного портового флота и внедрение судового оборудования для автономных судов отечественного производства. Комитет по безопасности на море (КБМ) Международной морской организации (ИМО) также активно

занимается различными исследованиями в данной области. Так, в сентябре 2024 года состоялось третье заседание Межсессионной рабочей группы по теме разработки Кодекса МАНС. В центре внимания находились такие вопросы как планирование перехода, контроль за его выполнением, противопожарная защита и предотвращение столкновений.

Классификация МАНС Российского Морского Регистра Судоходства (РС) [2] включает в себя категорию судов с полностью автономным управлением без присутствия человека на борту («полностью автономное судно» или «fully-autonomous ship»). Одними из самых сложных судоводительских задач, стоящих перед данной категорией МАНС, являются прохождение узкостей, проливов и маневрирование при заходе/выходе из порта.

Эти задачи зачастую связаны с обеспечением безопасной проводки судна по криволинейной траектории. Для безаварийного прохождения поворота система управления средствами навигации и маневрирования МАНС должна безошибочно определять, в какой момент необходимо начинать маневрирование, а также определять алгоритм перекладки средства управления (СУ).

Маневр поворота можно разделить на следующие этапы:

1. перевод судна с прямолинейной траектории на поворот заданного радиуса R ;
2. движение по криволинейной траектории заданного радиуса R ;
3. перевод судна с криволинейной траектории заданного радиуса R на прямолинейный участок.

Значение радиуса R может быть получено системой управления средствами навигации и маневрирования МАНС от электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС) или задано на этапе планирования перехода.

В конце первого этапа выполнения поворота мгновенный радиус кривизны траектории судна R_i должен сравняться с величиной R и стать неизменным [3], то есть

$$R_i = R; \quad \frac{dR_i}{dt} = 0. \quad (1)$$

Величина R_i определяется по выражению [4]:

$$R_i = \frac{v}{\omega - \frac{d\beta}{dt}}. \quad (2)$$

Здесь v – линейная скорость центра масс (ЦМ) судна;

ω – угловая скорость вращения судна;

β – угол дрейфа по ЦМ судна.

Расчёт параметров v , ω , β производится путём решения системы уравнений неуставившегося криволинейного движения судна, например [5, 6].

Алгоритм управления обычным судном (рис. 1), применимый и к МАНС, имеет следующий вид [3]:

$$\begin{aligned} D_n &= x_0 - R \sin \varphi; \\ \delta_n &= \omega_r t_1; \\ \delta'_n &= \delta_n - \omega_r t_2; \\ t_3^n &= t_1 - \frac{\delta_{max}}{\omega_r}, \end{aligned} \quad (3)$$

где D_n – дистанция упреждения начала маневра;

x_0 – продольное смещение ЦМ судна;

φ – угол скорости;

δ_n – угол перекладки СУ в сторону поворота;

ω_r – угловая скорость перекладки рулевого органа;

t_1 – время перекладки СУ в сторону поворота (при необходимости включает в себя

время задержки СУ на борту t_3^n);
 t_2 – время одерживания;
 δ'_n – угол перекладки СУ в противоположную повороту сторону;
 $\delta_{\max}$ – максимально допустимый угол перекладки СУ.

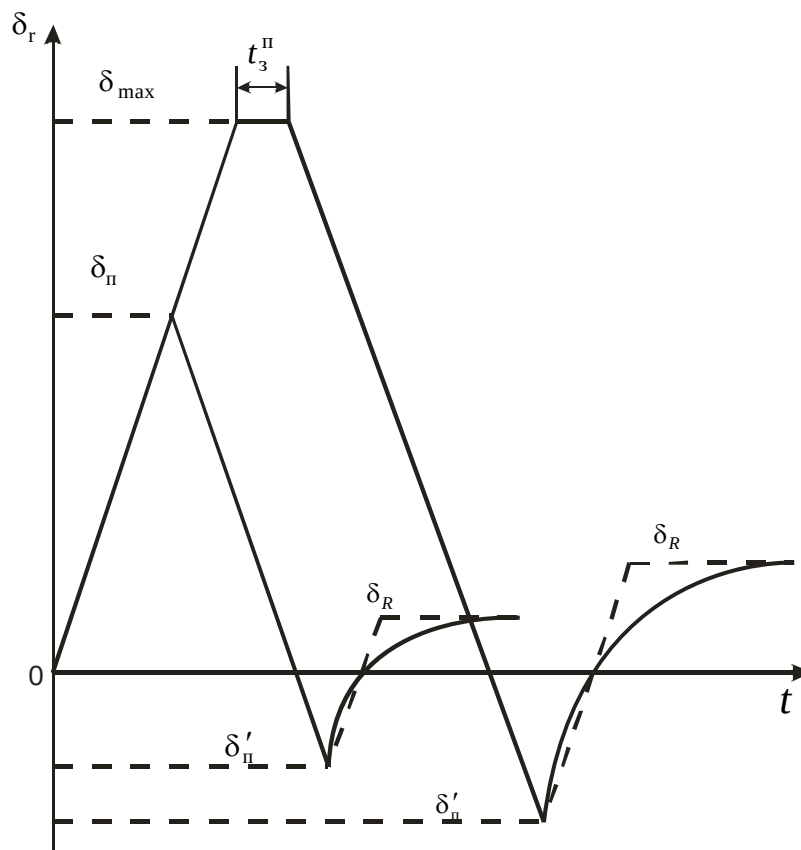


Рисунок 1 – Алгоритм перекладки СУ при переводе МАНС с прямолинейной траектории на поворот заданного радиуса

Значение $\delta_{\max}$ в зависимости от условий плавания и скорости движения МАНС может быть приравнено как к максимально возможной перекладке СУ, так и к некоторому промежуточному значению. На начальных этапах развития МАНС эту задачу может выполнять вахтенный помощник внешнего капитана, а впоследствии и сама система управления.

При использовании данного алгоритма система управления средствами навигации и маневрирования МАНС должна задаться некоторым значением t_1 и рассчитать t_2 так, чтобы выполнялись условия (1). После этого проверяется следующее условие:

$$|R_i - R| \leq 0,01R. \quad (4)$$

Если условие (4) по итогам расчётов не выполнилось, система управления средствами навигации и маневрирования МАНС должна изменить t_1 и повторить расчёт. Если $R_i < R$, то величина t_1 уменьшается на фиксированное значение Δt , а при обратной ситуации – увеличивается на то же значение. В результате таких вычислений получаются значения R_i ближайшие к требуемому радиусу. Далее для нахождения оптимального значения t_1 используется метод деления отрезка пополам.

Последующая перекладка СУ производится таким образом, чтобы выполнялись условия (1). Тогда ЦМ судна будет перемещаться по дуге окружности радиуса R .

В конце третьего этапа выполнения поворота мгновенный радиус кривизны траектории судна R_i должен стать бесконечным и неизменным [3], то есть

$$R_i = \infty \text{ или } \omega - \frac{d\beta}{dt} = 0; \frac{dR_i}{dt} = 0. \quad (5)$$

Алгоритм управления МАНС (рис. 2) будет следующим [3]:

$$\begin{aligned} \psi_n &= \Delta\psi_R - \psi_{од}; \\ \delta_{од} &= \delta_R - \omega_r t_1; \\ \delta'_{од} &= \delta_{од} + \omega_r t_2; \\ t_3^{од} &= t_1 - \frac{\delta_R + \delta_{max}}{\omega_r}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ψ_n – курс судна в момент начала его перевода с круговой траектории на прямолинейный участок пути;

$\Delta\psi_R$ – угол поворота оси судового хода на криволинейном участке радиуса R ;

$\psi_{од}$ – угол упреждения начала одерживания;

$\delta_{од}$ – угол перекладки руля в противоположную повороту сторону;

δ_R – угол перекладки СУ на установившейся циркуляции (повороте);

t_1 – время перекладки СУ в противоположную повороту сторону (при необходимости включает в себя время задержки СУ на борту $t_3^{од}$);

$\delta'_{од}$ – угол перекладки руля в сторону поворота;

t_2 – время одерживания.

При использовании данного алгоритма система управления средствами навигации и маневрирования МАНС, как и в предыдущем случае, должна задаться некоторым значением t_1 и рассчитать t_2 так, чтобы выполнялись условия (5). После этого проверяется следующее условие:

$$R_i > 100L, \quad (7)$$

где L – длина судна.

Если условие (7) по итогам расчётов не выполнилось, система управления средствами навигации и маневрирования МАНС должна изменить t_1 и повторить расчёт. Если $R_i < 0$, то величина t_1 уменьшается на фиксированное значение Δt , а при $R_i > 0$ – увеличивается на то же значение.

Последующая перекладка СУ производится таким образом, чтобы выполнялись условия (5). В таком случае ЦМ судна будет перемещаться по прямолинейной траектории.

