

УДК [656.61.052.1 : 527] : 639.2.081.117

Динамика судна при прицельном траловом лове

А.А. Соловьев, С.Н. Шугай

Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства

Аннотация. В работе исследована динамика судна при автоматическом облове подвижных рыбных скоплений. Предложены алгоритмы построения траекторий прицельного траления. Приведены примеры построения траекторий при облове подвижных косяков пелагическим тралом.

Abstract. The paper considers the dynamics of vessel at automatic catch of mobile fish congestions. The algorithms of constructing trajectories of aim trawling have been proposed. Examples of plotting trajectories at fishing mobile schools by the pelagic trawl have been given.

Ключевые слова: траловый лов, математическое моделирование, пропорциональная навигация, рыболовное судно, автоматизация, программная траектория

Key words: trawling fishing, mathematical modeling, proportional navigation, fishing vessel, automation, program trajectory

1. Введение

Одним из основных способов прицельного лова в настоящее время является траловый лов. Первой задачей настоящего исследования является изучение динамики идеального движения судна или системы "судно – трал" при прицельном облове подвижного рыбного скопления.

Динамику идеального движения судна будем изучать при следующих ограничениях:

- движение центра плотности рыбного скопления – равномерное и прямолинейное;
- скорость судна и трала постоянны.

Судно будем рассматривать как твердое тело, управляемое рулевым устройством, движущееся под действием силы тяги винта, гидродинамических и инерционных сил и их моментов.

Динамический анализ идеального движения позволит определить возможность осуществления прицельного облова рыбного скопления при данных начальных условиях движения, а также построить траектории движения судна и орудия лова для выбранного способа облова.

2. Математическая модель движения системы "судно – трал"

В общем случае, система уравнений, описывающих движение системы "судно – трал", выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} m(1+k_{11})\dot{v}\cos\beta - m(1+k_{11})v\dot{\beta}\sin\beta + m(1+k_{22})v\omega\sin\beta = T_E - X_K - X_P - T_X; \\ -m(1+k_{22})\dot{v}\sin\beta - m(1+k_{22})v\dot{\beta}\cos\beta + m(1+k_{11})v\omega\cos\beta = Y_K + Y_B - Y_P + Y_A + T_Y; \\ J_Z(1+k_{66})\dot{\omega} - m(k_{22}-k_{11})v^2\sin\beta\cos\beta = M_K + M_P - M_B - M_T - M_A, \end{cases} \quad (1)$$

где k_{11} , k_{22} – коэффициенты присоединенных масс вдоль продольной и поперечной осей судна; k_{66} – коэффициент присоединенного момента инерции; m – масса судна; J_z – момент инерции судна относительно вертикальной оси OZ; X_P , Y_P , M_P – продольная, поперечная силы на руле и момент, создаваемый поперечной силой руля относительно ЦТ судна; X_K , Y_K , M_K – продольная, поперечная корпусные силы и момент, создаваемый поперечной корпусной силой относительно ЦТ судна; Y_B , M_B – поперечная сила от гребного винта, и момент, создаваемый этой силой относительно ЦТ судна; Y_A , M_A – поперечная аэродинамическая сила, и момент, создаваемый этой силой относительно ЦТ судна; T_E – полезная тяга гребного винта; T_B – горизонтальная составляющая силы натяжения ваеров; $T_X = T_B \cos \gamma$ – проекция силы T_B на ось OX; $T_Y = T_B \sin \gamma$ – проекция силы T_B на ось OY; $M_T = T_Y l_B$ – момент от силы T_Y ; γ – угол между ДП и направлением силы T_B , отсчитываемый по корме судна; l_B – расстояние между точкой крепления ваеров и центром тяжести судна.

Авторами предложены алгоритмы построения траекторий прицельного траления, в основе которых лежит метод пропорциональной навигации. Суть метода состоит в том, что угловая скорость вращения вектора скорости "преследователя" должна быть прямо пропорциональна угловой скорости линии визирования. В общем случае эта зависимость выражается уравнениями:

$$d\varphi/d\tau = K d\theta/d\tau; \quad d^2\varphi/d\tau^2 = K d^2\theta/d\tau^2; \quad d^3\varphi/d\tau^3 = K d^3\theta/d\tau^3, \quad (2)$$

где φ – угол скорости тралы, K – коэффициент пропорциональности, θ – угол визирования.

Интегрируя уравнение (2) получаем:

$$\varphi = K\theta + C; \quad C = \theta(1 - K) + \varepsilon_0, \quad (3)$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая по начальным данным, ε_0 – начальный угол упреждения.

Для получения автономного уравнения, связывающего угол скорости тралы φ с углом перекладки руля, были использованы линеаризованные уравнения движения системы "судно – трал", которые достаточно хорошо описывают движение системы в слабых маневрах:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = B_1\beta + B_2\omega + B_3\alpha_R + B_4\gamma; \\ \dot{\beta} = A_1\beta + A_2\omega + A_3\alpha_R + B_4\gamma; \\ \dot{q} = \omega - \dot{\beta}; \\ \dot{q} = \varphi + L_T \dot{\varphi}/v_T, \end{cases} \quad (4)$$

где β – угол дрейфа судна; ω – угловая скорость судна; γ – угол отклонения ваеров от диаметральной плоскости судна; α_R – угол перекладки руля; φ – угол скорости тралы; q – угол скорости судна; L_T – длина горизонтальной проекции ваеров; \mathcal{G}_T – скорость тралы; A_1 – A_4 и B_1 – B_4 – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров системы судна.

Система уравнений (4) содержит пять неизвестных (β , ω , q , γ , φ), каждое из которых принципиально может быть принято за управляемую координату, и один параметр управления α_R . Последовательным исключением из системы этих уравнений всех неизвестных, кроме одной, можно получить независимые уравнения относительно каждой управляемой координаты. Автономное уравнение, связывающее угол скорости с углом перекладки руля, имеет вид:

$$d\varphi^4/d\tau^4 + C_1\ddot{\varphi} + C_2\dot{\varphi} + C_3\varphi = C_4\alpha_R + C_5\dot{\alpha}_R. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет определить закон изменения угла руля при движении тралы по любой кривой, уравнение которой может быть представлено в виде:

$$\varphi = f_1(\tau); \quad \dot{\varphi} = f_2(\tau, \varphi); \quad \ddot{\varphi} = f_3(\tau, \varphi, \dot{\varphi}); \quad \ddot{\varphi} = f_4(\tau, \varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}); \quad d\varphi^4/d\tau^4 = f(\tau, \varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \ddot{\varphi}). \quad (6)$$

Таким образом, задавая начальные позиции косяка и тралы, курс и скорость косяка, а также способ наведения, можно получить законы изменения угла визирования и расстояния "трал – косяк"; из уравнения (6) – получить закон изменения угла скорости тралы, построить траектории движения тралы и судна для выбранного способа наведения; из уравнения (5) – получить закон перекладки руля. Система уравнений (4) позволит вычислить угол дрейфа и угловую скорость судна и определить гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус судна. В результате станет возможным моделирование ситуации облова рыбного скопления на ЭВМ.

3. Вычисление коэффициента пропорциональности

В качестве способов прицельного траления изучим наведение тралы на подвижный косяк при различных значениях коэффициента K и начального угла упреждения. Расчет результатов маневра до начала его реального выполнения позволит прогнозировать развитие навигационно-промысловых ситуаций и заблаговременно принимать решение по безопасному управлению системой "судно – трал".

Сравнительный анализ кинематических и динамических параметров движения системы "судно – трал" позволяет сделать следующие выводы:

1. Чем больше коэффициент пропорциональности K , тем больше начальная угловая скорость, которая к концу маневра стремится к нулю.
2. При $K = 1$ угловая скорость возрастает в конце маневра, т.е. когда трал находится в непосредственной близости от косяка, что делает этот способ наведения практически непригодным.

Таким образом, выбор коэффициента пропорциональности представляет собой отдельную задачу, которую необходимо решать для конкретных начальных условий наведения. Для решения этой задачи можно, например, провести множественный регрессионный анализ с целью получения полинома относительно K :

$$K = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1X_2 + a_6X_1X_3 + a_7X_1X_4 + a_8X_2X_3 + a_9X_2X_4 + a_{10}X_3X_4 + a_{11}X_1^2 + a_{12}X_2^2 + a_{13}X_3^2 + a_{14}X_4^2,$$

где $X_1 = v_K / v$; $X_2 = D_K / L_T$; $X_3 = K_K - \Psi$; $X_4 = K_Y$; Ψ – курс судна; K_Y – курсовой угол на центр плотности косяка (ЦПК).

Для определения области допустимых управлений методом пропорциональной навигации был поставлен вычислительный эксперимент, при проведении которого исходные начальные условия варьировались в следующих диапазонах: $v_K / v = 0 \div 1$; $D_K / L_T = 0 \div 5$; $K_K - \Psi = 0 \div 315^\circ$; $K_Y = 0 \div 90^\circ$. По результатам вычислений проведен множественный нелинейный регрессионный анализ, в результате которого определены коэффициенты квадратичного полинома, позволяющего вычислять коэффициент пропорциональности K применительно к предложенной математической модели при любых начальных условиях сближения:

$$K = -2,35 v_K / v - 0,00044 (K_K - \Psi) + 0,0118 (K_K - \Psi) v_K / v - 0,000172 K_Y^2 + 4,43.$$

4. Вычисление сигнала управления при автоматическом наведении трала на рыбное скопление

Вычисление сигнала управления при реальном автоматическом наведении трала на подвижный косяк методом пропорциональной навигации будет производиться в следующей последовательности.

- После обнаружения косяка и определения его промысловой значимости автоматизированная система тралового лова определяет курсовой угол K_Y и дистанцию D_K центра плотности косяка, а также глубину его залегания Z_K и параметры его движения K_K и v_K . Косяк берется на автосопровождение.
- Определяется угол отклонения трала γ и дистанция до его устья L_T .
- Вычисляются координаты центра плотности косяка и центра устья трала относительно судна:

$$X_K = D_K \cos K_Y; \quad Y_K = D_K \sin K_Y; \quad X_T = -L_T \cos \gamma; \quad Y_T = L_T \sin \gamma.$$

- Вычисляются текущие значения угла визирования "трал – косяк" и угла скорости трала:

$$\Theta = \arctg[(Y_K - Y_T) / (X_K - X_T)]; \quad \varphi = \Psi - \gamma.$$

- Вычисляются начальный угол упреждения и постоянная упреждения:

$$\varepsilon_0 = \varphi - \Theta,$$

$$C = \Theta (1 - K) + \varepsilon_0.$$

- Вычисляется расчетный угол скорости трала:

$$\varphi_P = K\theta + C.$$

- Вычисляется угол рассогласования и скорость его изменения:

$$\Delta\varphi = \varphi_P - \varphi, \quad \Delta\dot{\varphi} = \Delta\varphi / \Delta t,$$

- Вычисляется управляющий сигнал:

$$\varepsilon_C = k_\theta \Delta\varphi - k_\dot{\varphi} \Delta\dot{\varphi} - k_{OC} \alpha_R.$$

5. Заключение

Полученные алгоритмы позволяют:

- построить траектории движения судна и трала при прицельном наведении последнего на центр плотности рыбного скопления;
- рассчитать угол перекладки руля и кинематические характеристики системы "судно – трал" (угол дрейфа, угловую скорость судна, угол отклонения ваеров от диаметральной плоскости судна) в течение всего периода наведения трала на центр плотности рыбного скопления;
- используя кинематические характеристики, рассчитать силы и моменты, действующие на корпус судна;
- сформировать управляющий сигнал для автоматического наведения трала на рыбное скопление в горизонтальной плоскости.