

УДК [656.61.052.1 : 527.6] : 639.2.06 : 639.2.081.117

Применение метода пропорциональной навигации для прицельного облова подвижных рыбных скоплений

А.А. Соловьев, С.Н. Шугай

Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства

Аннотация. В работе исследовалось применение метода пропорциональной навигации к управлению судном при облове подвижных рыбных скоплений. На основании этого метода предложены алгоритмы построения траекторий прицельного траления и замата кошелькового невода. Приведены примеры построения траекторий при облове подвижных косяков как пелагическим тралом, так и кошельковым неводом.

Abstract. The paper considers application of the method of proportional navigation to management of a vessel at fishing mobile fish congestion. On the basis of this method algorithms of constructing trajectories of aim trawling and purse seine shooting have been offered. Examples of plotting trajectories at fishing mobile schools both by pelagic trawl and purse seine have been given.

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

Key words: trawling fishing, purse seining, proportional navigation, fishing vessel, automation, program trajectory

1. Введение

Основными способами прицельного лова в настоящее время являются траловый и кошельковый лов. Задачей нашего исследования является изучение динамики идеального движения судна или системы судно-трал при прицельном облове подвижного рыбного скопления. Этот раздел логически развивает кинематическое изучение прицельного лова.

Изучение динамики идеального движения производится при следующих ограничениях:

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

В отличие от кинематического исследования, судно рассматривается как твердое тело, управляемое рулевым устройством, движущееся под действием силы тяги винта, гидродинамических и инерционных сил и их моментов. Динамический анализ идеального движения позволяет судить о возможности осуществления прицельного облова рыбного скопления при данных начальных условиях движения, а также построить траектории движения судна и орудия лова для выбранного способа облова.

2. Теоретический принцип обоснования применения метода пропорциональной навигации при прицельном облове подвижных рыбных скоплений

Авторами предложены алгоритмы построения траектории прицельного траления и замата кошелькового невода, 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:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = K \frac{d\Theta}{d\tau}; \quad \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = K \frac{d^2\Theta}{d\tau^2}; \quad \frac{d^3\varphi}{d\tau^3} = K \frac{d^3\Theta}{d\tau^3}; \quad \frac{d^4\varphi}{d\tau^4} = K \frac{d^4\Theta}{d\tau^4}, \quad (1)$$

где φ – угол скорости судна при кошельковом лове и угол скорости трала при траловом лове, K – коэффициент пропорциональности, Θ – угол визирования.

Интегрируя уравнение (1) получаем:

$$\varphi = K\Theta + C; \quad C = \Theta(1-K) + \varepsilon_0, \quad (2)$$

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

Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти зависимость между углом визирования и углом скорости трала (при траловом лове) или углом скорости судна (при кошельковом лове), а также определить закон изменения угла упреждения при изучении динамики замата кошелькового невода на постоянном курсовом угле или на постоянной дистанции от центра плотности косяка (ЦПК).

Принимая допущение о постоянстве курса K_K и скорости v_K косяка в процессе всего сближения, можно легко найти выражения для определения производных, входящих в уравнения (1).

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = \frac{\vartheta_K \sin(K_K - \Theta) - \vartheta_T \sin[\Theta(K-1) + C]}{D_K} \quad (3)$$

$$\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} = - \left\{ \vartheta_K \cos(K_K - \Theta) + \vartheta_T (K-1) \cos[\Theta(K-1) + C] + \frac{dD_K}{d\tau} \right\} \frac{d\Theta}{d\tau} / D_K; \quad (4)$$

$$\frac{d^3\Theta}{d\tau^3} = - \left\{ \vartheta_K \left[\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \cos(K_K - \Theta) + \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^2 \sin(K_K - \Theta) \right] + \vartheta_T (K-1) \left[\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \cos[\Theta(K-1) + C] - \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^2 (K-1) \sin[\Theta(K-1) + C] \right] + \frac{d^2 D_K}{d\tau^2} \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} + 2 \frac{dD_K}{d\tau} \cdot \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \right\} / D_K; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4\Theta}{d\tau^4} = & - \left\{ \vartheta_K \left[\frac{d^3\Theta}{d\tau^3} \cos(K_K - \Theta) + 3 \frac{d\Theta}{d\tau} \cdot \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \sin(K_K - \Theta) - \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^3 \cos(K_K - \Theta) \right] - \vartheta_T (K-1) \times \right. \\ & \times \left. \left\{ \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^3 (K-1)^2 \cos[\Theta(K-1) + C] + 3 \frac{d\Theta}{d\tau} \cdot \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} (K-1) \sin[\Theta(K-1) + C] - \frac{d^3\Theta}{d\tau^3} \cos[\Theta(K-1) + C] \right\} + \right. \\ & \left. \left. + 3 \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \cdot \frac{d^2 D_K}{d\tau^2} + 3 \frac{d^3\Theta}{d\tau^3} \cdot \frac{dD_K}{d\tau} + \frac{d\Theta}{d\tau} \cdot \frac{d^3 D_K}{d\tau^3} \right\} / D_K; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\frac{dD_K}{d\tau} = \vartheta_K \cos(K_K - \Theta) - \vartheta_T \cos[\Theta(K-1) + C]; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 D_K}{d\tau^2} = \Theta \{ \vartheta_K \sin(K_K - \Theta) + \vartheta_T (K-1) \sin[\Theta(K-1) + C] \}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3 D_K}{d\tau^3} = & \vartheta_K \left[\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \sin(K_K - \Theta) - \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^2 \cos(K_K - \Theta) \right] + \vartheta_T (K-1) \left\{ \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^2 (K-1) \cos[\Theta(K-1) + C] + \right. \\ & \left. + \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \sin[\Theta(K-1) + C] \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

где D_K – расстояние от судна или устья трала до центра плотности косяка.

3. Траловый лов

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

$$\begin{cases} \dot{\beta} = A_1 \beta + A_2 \omega + A_3 \alpha_R + A_4 \gamma; \\ \dot{\omega} = B_1 \beta + B_2 \omega + B_3 \alpha_R + B_4 \gamma; \quad \dot{\gamma} = \omega - \vartheta(\gamma - \beta) / L_T, \\ \dot{q} = \omega - \dot{\beta}, \\ \dot{\varphi} = \varphi + L_T \dot{\varphi} / \vartheta_T \end{cases} \quad (10)$$

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 трала; q – угол скорости судна; L_T – длина горизонтальной проекции ваеров; ϑ_T – скорость трала. $A_1 - A_4$ и $B_1 - B_4$ – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров системы судно-трал.

Система уравнений (10) содержит пять неизвестных ($\beta, \omega, q, \gamma, \varphi$), 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:

$$\frac{d^4 \varphi}{d\tau^4} + C_1 \ddot{\varphi} + C_2 \dot{\varphi} + C_3 \varphi = C_4 \alpha_R + C_5 \dot{\alpha}_R. \quad (11)$$

Уравнение (9) позволяет определить закон изменения угла руля при движении трала по любой кривой, уравнение которой может быть представлено в виде:

$$\varphi = f_1(\tau); \quad \dot{\varphi} = f_2(\tau, \varphi); \quad \ddot{\varphi} = f_3(\tau, \varphi, \dot{\varphi}); \quad \ddot{\varphi} = f_4(\tau, \varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}). \quad (12)$$

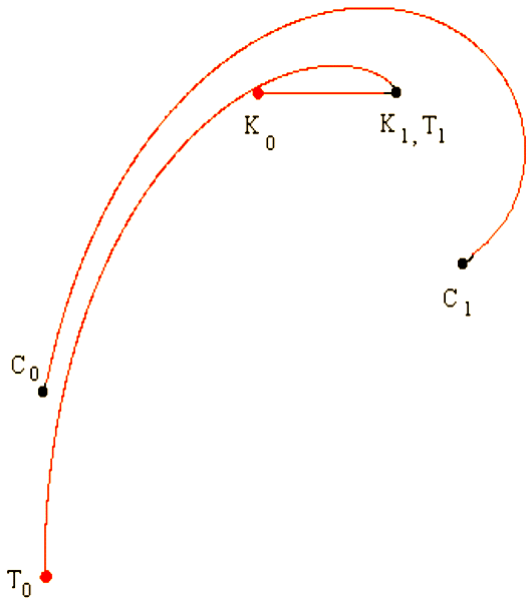


Рис. 1. Траектории судна (C_0-C_1), трала (T_0-T_1) и косяка (K_0-K_1) в процессе сближения при $K=1$

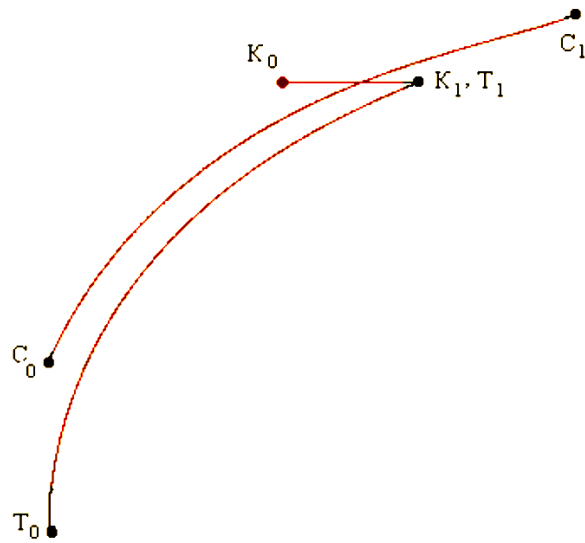


Рис. 2. Траектории судна (C_0-C_1), трала (T_0-T_1) и косяка (K_0-K_1) в процессе сближения при $K=2$

Таким образом, задавая начальные позиции косяка и трала, курс и скорость косяка, а также способ наведения, из уравнений (3-9) можно получить законы изменения угла визирования и расстояния трал-косяк, из уравнения (1-2) – закон изменения угла скорости трала, построить траектории движения трала и судна для выбранного способа наведения, из уравнения (11) – получить закон перекладки руля, а из системы уравнений (10) – угла дрейфа и угловой скорости судна для определения гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус судна, с целью моделирования ситуации облова рыбного скопления на ЭВМ.

В качестве способов прицельного траления изучалось наведение трала на подвижный косяк при различных значениях коэффициента K и начального угла упреждения. Расчет результатов маневра до начала его реального выполнения позволит судоводителю прогнозировать развитие навигационно-промысловой ситуации и заблаговременно принимать решение по безопасному управлению системой судно-трал.

На рис. 1-2 показаны расчетные траектории движения судна и трала при наведении последнего на движущийся косяк. Начальные условия для всех случаев одинаковы: курс судна – 45° , скорость судна – 4,5 узл., длина ваеров – 500 метров, пеленг на косяк – 40° , дистанция – 1000 м, курс косяка – 90° , скорость косяка – 1,0 узел. Маневр сближения выполнялся при коэффициентах пропорциональности: $K=1, K=2$.

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 ее решения 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 $X_1 = \vartheta_K / \vartheta$, $X_2 = D_K / L_T$, $X_3 = K_K - \Psi$, $X_4 = K_Y$, Ψ – курс судна, K_Y – курсовой угол на центр плотности косяка.

Для определения области допустимых управлений методом пропорциональной навигации был поставлен вычислительный эксперимент, при проведении которого исходные начальные условия варьировались в следующих диапазонах: $\vartheta_K / \vartheta = 0 \div 1$, $D_K / L_T = 0 \div 5$, $K_K - \Psi = 0 \div 315^\circ$, $K_Y = 0 \div 90^\circ$. По его результатам методом множественного нелинейного регрессионного анализа определены коэффициенты квадратичного полинома, позволяющего вычислять коэффициент пропорциональности K применительно к предложенной математической модели при любых начальных условиях сближения

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

Вычисление сигнала управления при реальном автоматическом наведении трала на подвижный косяк методом пропорциональной навигации производится в следующей последовательности:

- После обнаружения косяка и определения его промысловой значимости автоматизированная система тралового лова определяет курсовой угол K_V и дистанцию D_K центра плотности косяка, а также глубину его залегания Z_K и параметры его движения K_K и ϑ_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

$$X_K = D_K \cos K_V, \quad Y_K = D_K \sin K_V, \quad X_T = -L_T \cos \gamma, \quad Y_T = L_T \sin \gamma.$$

- 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

$$\varepsilon = \varphi - \Theta, \quad C = \Theta(1-K) + \varepsilon_0.$$

- 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

$$\varepsilon_c = k_\theta \Delta\varphi - k_\theta \Delta\dot{\varphi} - k_{oc} \alpha_R.$$

Приведенные выше алгоритмы прицельного траления реализованы в компьютерной программе "Fisher", используемой для математического моделирования процесса автоматического наведения разноглубинного трала на подвижный косяк при различных законах управления системой.

4. Кошельковый лов

При кошельковом лове система уравнений (10) упрощается, т.к. предполагается, что траектория кошелькового невода совпадает с траекторией движения судна

$$\begin{cases} \dot{\beta} = A_1\beta + A_2\omega + A_3\alpha_R; \\ \dot{\omega} = B_1\beta + B_2\omega + B_3\alpha_R; \\ \dot{\phi} = \omega - \beta. \end{cases} \quad (13)$$

Вследствие этого автономное уравнение, связывающее угол скорости судна φ с углом перекладки руля α_R , будет иметь вид:

$$\ddot{\varphi} + D_1 \dot{\varphi} + D_2 \varphi = D_3 \alpha_R + D_4 \dot{\alpha}_R. \quad (14)$$

Коэффициент пропорциональности при кошельковом лове может быть равен только единице, так как при $K > 1$ траектория движения судна не охватывает рыбное скопление из-за большой кривизны, а при $K < 1$ – из-за очень малой кривизны. При этих условиях, а также с учетом, что угол визирования Θ есть направление от ЦПК на судно, уравнения (3-9) принимают следующий вид:

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = -\frac{[\vartheta_K \sin(K_K - \Theta) - \vartheta \sin C]}{D_K}, \quad (15)$$

$$\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} = \left[\vartheta_K \cos(K_K - \Theta) - \frac{dD_K}{d\tau} \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} \right] / D_K; \quad (16)$$

$$\frac{d^3\Theta}{d\tau^3} = \left\{ \vartheta_K \left[\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \cos(K_K - \Theta) + \left(\frac{d\Theta}{d\tau} \right)^2 \sin(K_K - \Theta) \right] - \frac{d^2D_K}{d\tau^2} \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} - 2 \frac{dD_K}{d\tau} \cdot \frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \right\} / D_K; \quad (17)$$

$$\frac{dD_K}{d\tau} = -\vartheta_K \cos(K_K - \Theta) + \vartheta \cos C; \quad (18)$$

$$\frac{d^2D_K}{d\tau^2} = -\Theta \vartheta_K \sin(K_K - \Theta). \quad (19)$$

В настоящее время широко используются два вида прицельного замата кошелькового невода: на постоянном курсовом угле на ЦПК и при постоянной дистанции до ЦПК.

Процедуру замата можно разделить на три этапа:

1 этап. Замет невода на постоянном курсовом угле или дистанции до начала выполнения условия

$$L_H = S_1 + D_{\text{ТОН}}, \quad (20)$$

где L_H – длина кошелькового невода, S_1 – путь, пройденный судном на первом этапе замета, $D_{\text{ТОН}}$ – дистанция до точки отдачи невода (ТОН).

2 этап. Циркуляция судна с переложением на правый борт рулем до выполнения условия

$$\Psi = P_{\text{ТОН}}, \quad (21)$$

где Ψ – курс судна, $P_{\text{ТОН}}$ – пеленг в ТОН. Путь, проходимый судном на втором этапе замета, – S_2 .

3 этап. Прямолинейное движение в ТОН с выполнением пассивного торможения до выполнения условия

$$L_H = S_1 + S_2 + S_3, \quad (22)$$

где S_3 – путь, пройденный судном на третьем этапе замета.

В результате выполнения всех трех этапов между форштевнем судна и концевым бумом (ТОН) образуются "ворота", которые не должны превышать длину судна. Величина "ворот" может быть рассчитана по формуле $\Delta D = D_{\text{ТОН}} - L_C$, где L_C – длина судна.

Рассмотрим подробнее процедуру выполнения первого этапа замета кошелькового невода на постоянном курсовом угле на ЦПК.

Точка отдачи концевого бум (ТОН) определяется из данных о курсе, скорости косяка, направления и силы ветра, а также длины кошелькового невода. Обозначим координаты ТОН X_{C0} и Y_{C0} . Текущая дистанция до ТОН и пеленг в ТОН рассчитываются по формулам:

$$D_{\text{ТОН}} = \sqrt{(X_C - X_{C0})^2 + (Y_C - Y_{C0})^2}, \quad (23)$$

$$P_{\text{ТОН}} = 180^\circ + \arctg\left(\frac{Y_C - Y_{C0}}{X_C - X_{C0}}\right), \quad (24)$$

где текущие координаты судна вычисляются из выражений:

$$X_C = X_K + D_K \cos \Theta, \quad (25)$$

$$Y_C = Y_K + D_K \sin \Theta. \quad (26)$$

Путь, проходимый судном, определяется из дифференциального уравнения

$$\dot{S}_1 = \vartheta. \quad (27)$$

Для вычисления производных, входящих в уравнения (15-19), на каждом шаге интегрирования рассчитывается коэффициент $C = 180^\circ - \beta - K_Y$, где $K_Y = \text{const}$. В начальный момент времени угол дрейфа судна β принимается равным нулю. Затем из уравнения (1) определяем закон изменения угла скорости судна φ , из уравнения (4) – закон перекадки руля на первом этапе замета, а из системы уравнений (13) – текущий угол дрейфа и угловую скорость судна.

При замете невода на постоянной дистанции до ЦПК система уравнений (15-19) еще более упрощается:

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = -\frac{[\vartheta_K \sin(K_K - \Theta) - \vartheta \sin(C)]}{D_K}; \quad (28)$$

$$\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} = \vartheta_K \cos(K_K - \Theta) \cdot \frac{d\Theta}{d\tau} / D_K; \quad (29)$$

$$\frac{d^3\Theta}{d\tau^3} = \vartheta_K \left[\frac{d^2\Theta}{d\tau^2} \cos(K_K - \Theta) + \left(\frac{d\Theta}{d\tau}\right)^2 \sin(K_K - \Theta) \right] / D_K. \quad (30)$$

Текущий угол упреждения C определяется из уравнения (18) при условии, что $D_K/d\tau = 0$:

$$C = \arccos\left[\frac{\vartheta_K}{\vartheta} \cdot \cos(K_K - \Theta)\right].$$

Далее вычисления выполняются в той же последовательности, что и при замете невода на постоянном курсовом угле, при этом за управляемую координату можно принять курсовой угол на ЦПК или курс судна, вычисляемые по формулам

$$K_Y = 180^\circ - \beta - C, \quad \Psi = \Theta + 180^\circ - K_Y.$$

После завершения первого этапа замета невода, когда выполнится условие (20), судно необходимо совершить циркуляцию для выполнения условия (21). В этот период углы дрейфа могут

быть большими, и для построения траектории движения судна должны быть использованы нелинейные дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \dot{\beta} = A_1\beta + A_2\omega + A_3\alpha_R + A_5\beta \cdot |\beta|; \\ \dot{\omega} = B_1\beta + B_2\omega + B_3\alpha_R + B_5\beta \cdot |\beta| \cdot \omega; \\ \dot{\varphi} = \omega - \dot{\beta}; \\ \dot{X}_C = \vartheta \cdot \cos \varphi; \\ \dot{Y}_C = \vartheta \cdot \sin \varphi; \\ \dot{S}_2 = \vartheta. \end{cases} \quad (31)$$

В процессе поворота продолжают вычисляться пеленг и дистанция до ТОН по формулам (23) и (24).

После окончания второго этапа замета, при условии $\Psi = P_{\text{ТОН}}$, судно движется прямолинейно в ТОН, постоянно снижая скорость, с тем, чтобы третий участок невода S_3 был выложен по прямой линии, а скорость судна в конце замета была бы равной нулю. На рис. 3 показана траектория замета кошелькового невода на постоянном угле на ЦПК при следующих начальных значениях: $K_K = 0^\circ$, $\vartheta_K = 0,3$ м/с, $K_Y = 95^\circ$, $L_H = 1200$ м.

На рис. 4 показана траектория замета кошелькового невода на постоянной дистанции до ЦПК $D_K = 230$ м при тех же начальных значениях.

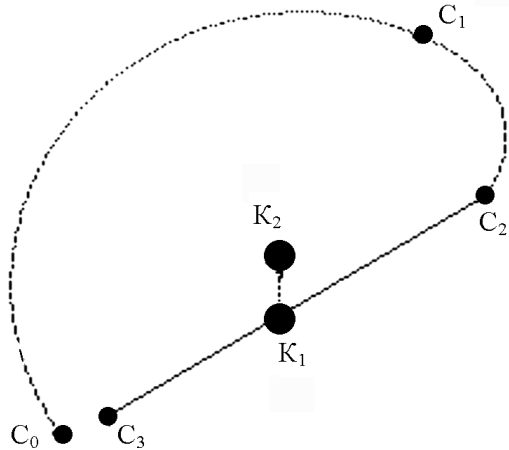


Рис. 3. Траектория замета кошелькового невода на постоянном угле на ЦПК

C_0-C_1 – траектория на первом этапе,
 C_1-C_2 – траектория на втором этапе,
 C_2-C_3 – траектория на третьем этапе,
 K_1-K_2 – траектория движения ЦПК.

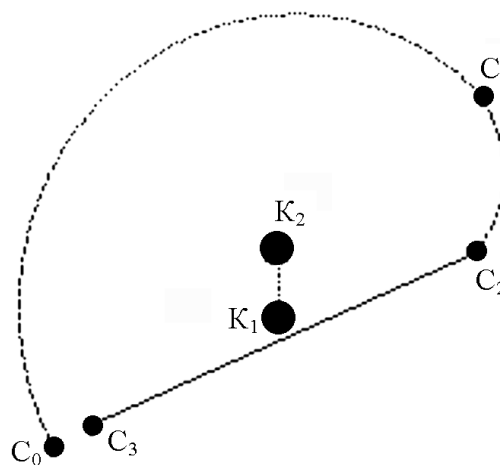


Рис. 4. Траектория замета кошелькового невода на постоянной дистанции до ЦПК

C_0-C_1 – траектория на первом этапе,
 C_1-C_2 – траектория на втором этапе,
 C_2-C_3 – траектория на третьем этапе,
 K_1-K_2 – траектория движения ЦПК.

4. Заключение

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, теоретически стремится к бесконечности, 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.

Коэффициент пропорциональности при кошельковом лове может быть равен только единице, т.к. при $K>1$ траектория движения судна не охватывает рыбное скопление из-за большой кривизны траектории, а при $K<1$ – из-за очень малой кривизны.

Применение предлагаемого метода позволяет осуществить разработку алгоритмов вычисления сигнала управления в автоматических системах облова подвижного рыбного скопления.