УДК 656.61.052.484

Калиниченко Е.В.
ОНМА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ПОВОРОТА СУДНА СПОСОБОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЕГО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Для обеспечения необходимой точности реализации криволинейных участков программной траектории движения судна параметры его поворота следует рассчитывать с использованием модели поворотливости с высокой степенью адекватности реальному процессу поворота.

В предлагаемой статье рассмотрен один из аспектов обсуждаемой проблемы – обоснование расчета момента времени начала поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории.

Вопросам исследования криволинейного движения судна при выполнении поворота посвящены работы [1 – 3]. Динамические модели поворотливости судна различной степени адекватности представлены в работе [1]. Результаты экспериментального исследования моделей поворотливости судна приведены в работе [2], а в работе [3] рассмотрено формирование переходной траектории поворота судна с учетом экспериментальных данных поворотливости судна.

При выполнении поворота судна характеристики его поворотливости учитываются приблизительно, что снижает точность выхода судна на очередной участок программного движения и ведет к увеличению вероятности возникновения навигационных аварий. Данное обстоятельство обуславливает актуальность тематики статьи.

Целью статьи является разработка процедуры расчета момента времени начала поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории для обеспечения требуемой точности выполнения поворота.

Рассмотрим процедуру расчета момента времени начала t_n поворота судна с курса K_1 на курс K_2 программной траектории движения (рис. 1). На рисунке начало системы координат OXY совмещено с начальным положением судна.

Допустим, что поворот судна начинается в начальный момент времени $t = 0$ и завершается в точке М выходом на курс K_2. Перемещая криволинейную траекторию поворота судна ОМ по направлению курса K_1 до совмещения точки М со вторым программным участком с курсом K_2, который проходит через точку *A*, определяем точку начала поворота с моментом времени t_n .

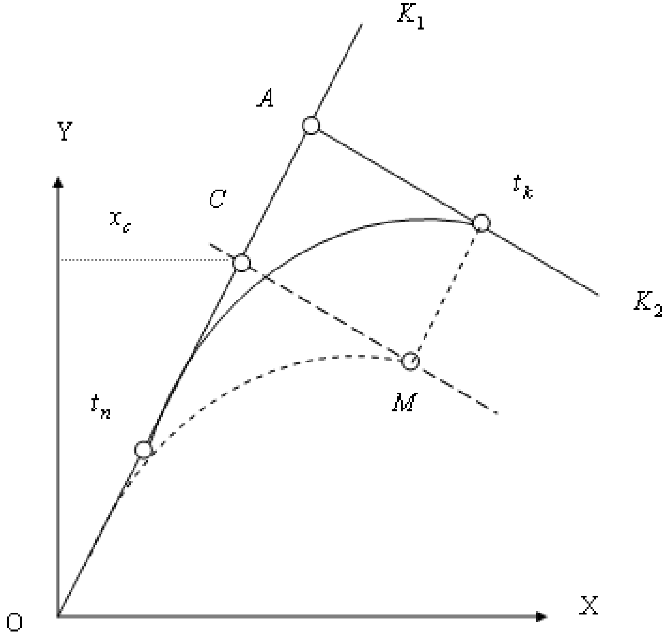

Рис. 1. Криволинейная траектория движения судна при повороте

Обоснуем аналитическое описание предложенного способа. Уравнение прямолинейного участка траектории с курсом K_1 имеет вид:

$$y = x\text{ctg}K_1 .$$

Уравнение прямой линии, проходящей через точку M курсом K_2 :

$$y = y_m + (x\text{-}x_m)\text{ctg}K_2 .$$

Координаты точки C (x_c , y_c) найдем, учитывая, что она является точкой пересечения упомянутых двух прямых линий, т.е. из системы уравнений:

$$\begin{cases} y_c = x_c\text{ctg}K_1; \\ y_c = y_m + (x_c\text{-}x_m)\text{ctg}K_2. \end{cases} \qquad (1)$$

Откуда:

$$x_c\text{ctg}K_1 = y_m + (x_c\text{-}x_m)\text{ctg}K_2 .$$

Из последнего уравнения находим

$$x_c = \frac{y_m - x_m \operatorname{ctg} K_2}{\operatorname{ctg} K_1 - \operatorname{ctg} K_2}.$$

С учетом первого уравнения системы уравнений (1) получим

$$OC = \sqrt{x_c^2 + x_c^2 \operatorname{ctg}^2 K_1} = \frac{x_c}{\sin K_1}.$$

Очевидно, что время t_n начала поворота судна

$$t_n = \frac{OA - OC}{V_1} = \frac{D - \dfrac{x_c}{\sin K_1}}{V_1} = \frac{D \sin K_1 - x_c}{V_1 \sin K_1}.$$

Для расчета значения x_c необходимо определить приращения координат судна x_m и y_m за время маневра τ:

$$x_m = \int_0^\tau V_1 \sin[K_1 + K(t)]\, dt, \quad y_m = \int_0^\tau V_1 \cos[K_1 + K(t)]\, dt. \qquad (2)$$

Поворот судна состоит из двух этапов, причем на первом этапе судно в течение интервала времени Δt_1 совершает поворот под действием переложенного руля на угол β_k.

Затем, на втором этапе, рули перекладываются на противоположный борт на ту же величину и в течение интервала времени Δt_2 гасится инерция поворота судна, а судно выходит на курс K_2.

Следовательно, выражение (2) принимает вид:

$$x_m = \int_0^{\Delta t1} V_1 \sin[K_1 + K]\, dt + \int_0^{\Delta t2} V_1 \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}]\, dt,$$

$$y_m = \int_0^{\Delta t1} V_1 \cos[K_1 + K]\, dt + \int_0^{\Delta t2} V_1 \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}]\, dt, \qquad (3)$$

где K и $\tilde{K}$ – текущее значение курса судна соответственно на первом и втором этапах поворота.

Принимаем наиболее точную модель вращательного движения [1], согласно которой:

$$K = K_1 + a_\omega \{t - \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\}/(T_1 - T_2)\}. \qquad (4)$$

$$\tilde{K} = K(\Delta t_1) - a_\omega t + a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)]/(T_1 - T_2)\} \times$$

$$\{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\}/(T_1 - T_2), \qquad (5)$$

где a_ω – установившееся значение угловой скорости поворота судна; T_1 и T_2 – постоянные времени, учитывающие инерционность судна.

Для вычисления интервалов времени Δt_1 и Δt_2, в течение которых курс судна изменяется на величину $\Delta K = K_2 - K_1$, в общем виде предложена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_1) + \tilde{K}(\Delta t_2); \\ \omega(\Delta t_1,\ \Delta t_2) = 0, \end{cases} \tag{6}$$

в которой первое уравнение является очевидным соотношением, а второе – является условием обращения в ноль к концу поворота угловой скорости ω судна.

Подставляя в выражение (6) формулы (4) и (5), получим зависимости, из которых можно рассчитать значения Δt_1 и Δt_2 методом простых итераций. После этого, используя полученные значения Δt_1 и Δt_2, подставляя формулы (4) и (5) в выражения (3), искомые приращения координат судна x_m и y_m рассчитываются следующим образом:

$$x_m = V_1\,[\int_0^{\Delta t1} y_1(t)\,dt + \int_0^{\Delta t2} y_2(t)dt]\ ;\ y_m = V_1\,[\int_0^{\Delta t1} y_3(t)\,dt + \int_0^{\Delta t2} y_4(t)dt]\ , \tag{7}$$

где $y_1(t) = \sin[K_1 + K\,(t)]$; $y_2(t) = \sin[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)\,]$; $y_3(t) = \cos[K_1 + K\,(t)]$; $y_4(t) = \cos[K_1 + K(\Delta t_1) + \tilde{K}(t)\,]$.

Каждый из четырех интегралов выражения (7) целесообразно вычислить методом Симпсона. В общем случае выражение искомого интеграла

$$\Im_i = \int_0^{\Delta ti} y_i(t)\,dt\ .$$

Интервал времени Δt_i, на котором производится интегрирование, необходимо разбить на четное число *n* элементарных интервалов h_j, длительность каждого из которых целесообразно выбрать равной h = 1 с. При этом $n = 2\mathrm{Trunc}(\Delta t_\mathrm{i}/2)$. В способе Симпсона подынтегральная функция $y_\mathrm{i}(t)$ на каждом отрезке $2h_j$, равном двум элементарным отрезкам, аппроксимируется интерполяционным многочленом Лагранжа второй степени и в этом случае справедливо соотношение:

$$\int_{t_{j-1}}^{t_{j+1}} y_i(t)dt \approx \frac{h}{3}[y_i(t_{j-1}) + 4y_i(t_j) + y_i(t_{j+1})].$$

Если обозначить $y_{ij} = y_i(t_j)$, то искомый определенный интеграл

$$\Im_i = \int_0^{\Delta t i} y_i(t)\,dt =$$

$$= \frac{h}{3}[y_{io} + 4(y_{i1} + y_{i3} + ... + y_{i(n-1)}) + 2(y_{i2} + y_{i4} + ... + y_{i(n-2)}) + y_{in}].$$

Момент времени t_k окончания поворота судна

$$t_k = t_n + \Delta t_1 + \Delta t_2 .$$

Для проверки корректности процедуры расчета моментов времени начала t_{n} и окончания t_k поворота судна была разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать моменты времени t_n и t_k, а затем проиграть поворот и оценить точность выхода судна с предыдущего прямолинейного участка программной траектории движения на последующий, как показано на рис. 2.

В реальных условиях эксплуатации производились натурные наблюдения поворотов судов "Oxford" и "Sheila Ann", в результате чего были рассчитаны параметры поворотливости обеих судов. Для двух экспериментальных поворотов судна "Oxford", характеристики которых представлены в первых двух строках табл., и трех – судна "Sheila Ann", представленных в ее остальных строках, можно сделать вывод о хорошей сходимости экспериментального и расчетного значений угла изменения курса (ΔK_{ex} с ΔK) и длительности поворота (Δt_{ex} с τ).

Таблица

Экспериментальные и расчетные характеристики поворотов судов

ΔK_{ex}, град	Δt_{ex} с	a_ω °/с	T_1 с	T_2 с	Δt_1 с	Δt_2 с	τ с	ΔK_1, град	ΔK_2, град	ΔK, град
28	44	0,88	9,61	1,69	37	8	45	24	4	28
35	40	1,28	8,89	1,54	34	8	42	30	5	35
41	238	0,19	12	4	225	13	238	40	2	42
64	392	0,17	12	4	380	13	393	62	2	64
62	278	0,24	12	4	265	13	278	60	2	62

Таким образом, получена процедура расчета момента времени начала поворота судна способом перемещения его криволинейной траектории с учетом параметров его поворотливости, характеризующих инерционность судна.

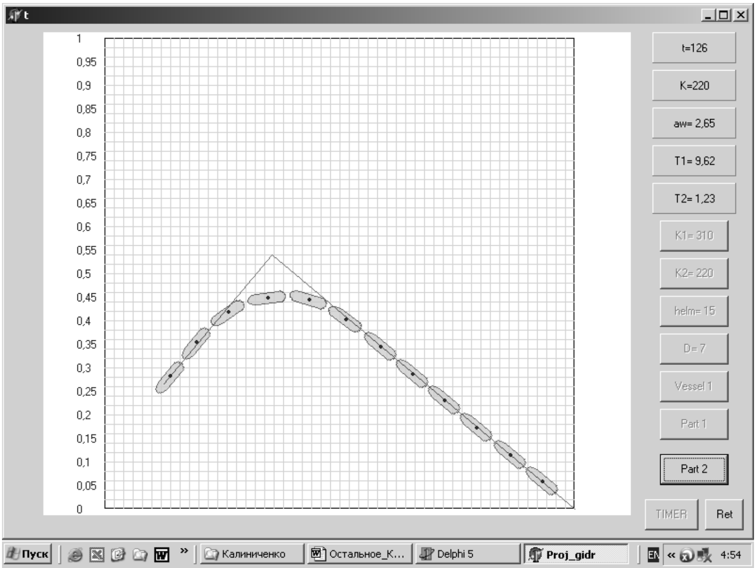

Рис. 2. Моделирование поворота судна с курса K_1 =310° на K_2 =220°

Для описания вращательного движения судна выбрано дифференциальное уравнение третьего порядка. В дальнейшем целесообразно разработать алгоритм расчета курса уклонении судна для расхождения с опасной целью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

2. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна // Судовождение: сб. научн. трудов. – Одесса: ОНМА. – 2006. – № 11. – С. 139 – 142.

3. Стебновский О.В. Формирование переходной траектории поворота судна // Автоматизация судовых технических средств. – 2010. – № 16. – Одесса: ОНМА. – С. 92 – 95.

4. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления – Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.