УДК 656.61.052.484

CALCULATION OF MOMENTS OF TURN BEGINNING AND COMPLETION CONSIDERING VESSEL TURNING ABILITY

РАСЧЕТ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА И ОКОНЧАНИЯ ПОВОРОТА СУДНА С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО ПОВОРОТЛИВОСТИ

Kalinichenko E.V., *senior lecturer*
Калиниченко Е.В., *старший преподаватель*

Odessa National Maritime Academy, Ukraine
Одесская Национальная Морская Академия, Украина

ABSTRACT

Procedure for calculation of moments of turn beginning and completion taking into account parameters of vessel turning ability obtained in the article.

For the purpose of description of rotatory motion of a vessel, third order differential equalization applied, characterizing change of heading depending on the rudder angle.

Keywords: safety of navigation, turn of vessel, maneuvering parameters, differential equalization of vessel`s motion.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Точность реализации криволинейных участков программной траектории движения судна зависит от степени адекватности модели поворотливости судна реальному процессу его поворота и корректности выбора параметров маневра поворота.

В предлагаемой статье рассмотрен один из аспектов обсуждаемой проблемы – расчет моментов времени начала и завершения поворота судна с учетом его инерционности.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Работы [1-3] посвящены вопросам исследования криволинейного движения судна при выполнении поворота. Формирование переходной траектории поворота судна с учетом экспериментальных данных поворотливости судна рассмотрено в работе [1], а в работе [2] приведены результаты экспериментального исследования моделей поворотливости судна, а в работе [3] представлены динамические модели поворотливости судна различной степени адекватности. 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.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является разработка методики расчета моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом характеристик его поворотливости.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Поворот судна состоит из двух фаз. Сначала, на первой фазе, в начальный момент времени t_n, когда судно следует курсом K_1, производится перекладка пера руля на угол β_k и руль удерживается в таком положении в течение интервала времени Δt_1. Затем на второй фазе поворота производится одерживание судна, т.е. производится перекладка руля на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени Δt_2, по истечению которого судно выходит на заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, перо руля приводится в диаметральную плоскость судна, а судно выходит на курс K_2.

Рассмотрим расчет моментов времени начала t_n и окончания t_k поворота судна с курса K_1 на курс K_2 программной траектории движения (рис. 1) с учетом характеристик его поворотливости. На рисунке начало системы координат OXY совмещено с начальным положением судна.

Из рис. 1 следует, что момент начала поворота t_n определяется соотношением $t_n = \dfrac{L}{V_o}$, причем:

$$L = \mathrm{Abs}[(L_p - l_2)/\sin\Delta K] \quad \text{и} \quad \Delta K = K_2 - K_1.$$

Выражение для значения L_p можно найти по известным координатам точки поворота M (X_M, Y_M), т. е.:

$$L_p = \sqrt{X_M^2 + Y_M^2}\,\sin\Delta K.$$

Величина отрезка l_2 может быть получена, как проекция приращения координат судна $\Delta x(\tau_k)$ и $\Delta y(\tau_k)$ за время поворота τ_k на нормаль L_p, причем, как следует из рис. 1, величина l_2 определяется следующей зависимостью:

$$l_2 = \delta[\Delta x^2(\tau_k) + \Delta y^2(\tau_k)]^{1/2}\sin\varepsilon,$$

где $\varepsilon = \mathrm{arctg}[\Delta y(\tau_k)/\Delta x(\tau_k)] - K_2.$

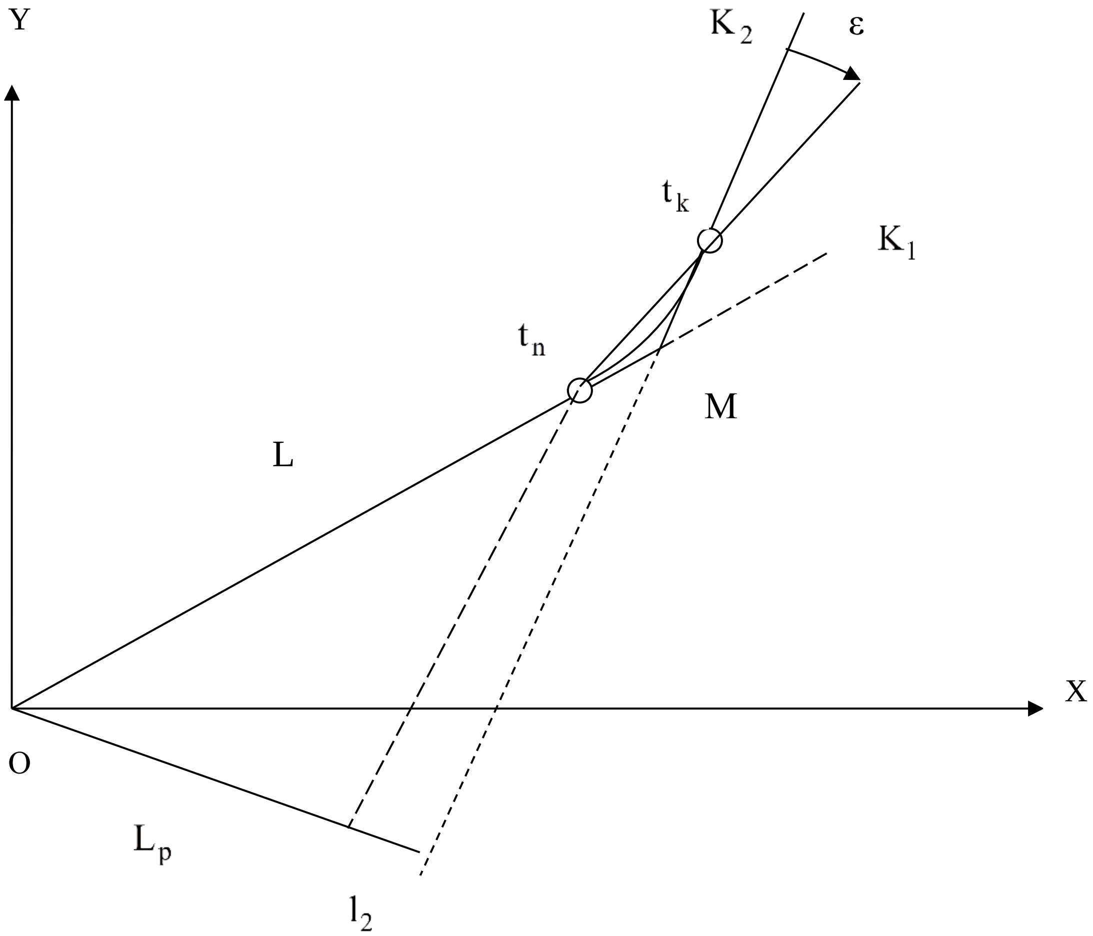

Рис. 1. Схема поворота судна

По известному значению изменения курса ΔK следует вычислить длительность поворота τ_k, состоящего из двух фаз, и приращение координат оперирующего судна $\Delta x(\tau_k)$ и $\Delta y(\tau_k)$ за время поворота τ_k.

Расчет величины отрезка l_2 производится с учетом динамической модели вращательного движения судна способом прямых итераций.

Изменение курса судна ΔK известно и должно быть реализовано на обоих этапах поворота, причем в работе [3] для вычисления интервалов времени Δt_1 и Δt_2, соответственно продолжительности первого и второго этапов, в общем виде предложена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \Delta K = K_1(\Delta t_1) + K_2(\Delta t_2) \\ \omega(\Delta t_1, (\Delta t_2) = 0 \end{cases}, \qquad (1)$$

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

Для записи приведенной системы в явном виде относительно искомых переменных Δt_1 и Δt_2 следует применить динамическую модель изменения курса судна K при его повороте, которая описывается неоднородным линейным дифференциальным уравнением третьего порядка с постоянными коэффициентами, и имеет следующий вид [4]:

$$T_1 T_2 \dddot{K} + (T_1 + T_2)\ddot{K} + \dot{K} = a_\omega,$$

где T_1 и T_2 - постоянные времени, характеризующие инерционные свойства судна;

$a_\omega = k_p \beta_k$, причем k_p - коэффициент эффективности руля.

Выражение для текущего значения курса судна K на первом и $\tilde{K}$ на втором этапах поворота имеет следующий вид:

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

$$\tilde{K} = K_1(\Delta t_1) - a_\omega t + a_\omega\{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)]/(T_1 - T_2)\}\times$$
$$\{T_1^2[1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2[1 - \exp(-t/T_2)]\}/(T_1 - T_2). \tag{3}$$

Данная модель, как показано в [3], позволяет записать систему уравнений (1) следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \Delta t_2 + \{T_1^2[1 - \exp(-\Delta t_1/T_1)] - T_2^2[1 - \exp(-\Delta t_1/T_2)]\}/(T_1 - T_2) - \\ -\{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)]/(T_1 - T_2)\}\times \\ \{T_1^2[1 - \exp(-\Delta t_2/T_1)] - T_2^2[1 - \exp(-\Delta t_2/T_2)]\}/(T_1 - T_2) + \Delta K/a_\omega, \\ \quad \Delta t_2 = -T_1 \ln\{(T_2/T_1)\exp(-\Delta t_2/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1]\times \\ \quad \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_1/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_1/T_2)]/(T_1 - T_2)\}^{-1}\}. \end{cases} \tag{4}$$

Расчет величин Δt_1 и Δt_2 методом простых итераций производится следующим образом. Вначале задаемся предыдущим значением Δt_1 и с помощью второго выражения вычисляем значение Δt_2, которое затем подставляется в первое выражение для расчета последующего значения Δt_1.

Найдем выражения для расчета приращений координат оперирующего судна Δx и Δy за время поворота τ. Искомые приращения координат выражаются следующим образом с помощью определенных интегралов:

$$\Delta x = \int_0^{\tau} V_o \sin[K_o + K(t)]dt, \qquad \Delta y = \int_0^{\tau} V_o \cos[K_o + K(t)]dt .$$

Также учитываем, что каждый из приведенных интегралов является суммой двух интегралов, соответствующим приращению координат на первой и второй фазе поворота, т. е.:

$$\Delta x = \int_0^{\Delta tk} V_o \sin[K_o + K]dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}]dt,$$

$$\Delta y = \int_0^{\Delta tk} V_o \cos[K_o + K]dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}]dt .$$

Вначале найдем выражение для приращения Δx, вынося из-под знака интеграла постоянные величины:

$$\Delta x = V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \cos(K)dt + V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \sin(K)dt +$$

$$V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos(\tilde{K})dt + V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin(\tilde{K})dt$$

затем, подставляя в последнее выражение формулы (2) и (3), получим следующую аналитическую зависимость:

$$\Delta x = V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \cos\{ a_\omega \{t - \{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] -$$

$$-T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}\}dt + V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \sin\{ a_\omega \{t -$$

$$-\{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] - T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}\}dt +$$

$$+ V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos\{ -a_\omega t +$$

$$a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)]/(T_1-T_2)\} \times$$

$$\{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] - T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}dt +$$

$$+ V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin\{ -a_\omega t +$$

$$a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)]/(T_1-T_2)\} \times$$

$$\{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] - T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}dt .$$

Аналогично находим выражение для Δy:

$$\Delta y = V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \cos(K)\,dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \sin(K)\,dt +$$

$$V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos(\tilde{K})\,dt - V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin(\tilde{K})\,dt$$

либо, подставляя выражения для K и $\tilde{K}$, получим:

$$\Delta y = V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \cos\{a_\omega\{t - \{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] -$$

$$-T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}\}dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \sin\{a_\omega\{t -$$

$$-\{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] - T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}\}dt +$$

$$+ V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos\{-a_\omega t +$$

$$a_\omega\{2-[T_1\exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2\exp(-\Delta t_k/T_2)]/(T_1-T_2)\}\times$$

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

$$- V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin\{-a_\omega t +$$

$$a_\omega\{2-[T_1\exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2\exp(-\Delta t_k/T_2)]/(T_1-T_2)\}\times$$

$$\{T_1^2[1-\exp(-t/T_1)] - T_2^2[1-\exp(-t/T_2)]\}/(T_1-T_2)\}dt.$$

Момент окончания поворота судна t_k рассчитывается по элементарному соотношению $t_k = t_n + \tau_k$, причем в момент времени t_k судно находится на программной траектории и следует заданным курсом K_2.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В статье получена методика расчета моментов времени начала и окончания поворота судна с учетом параметров его поворотливости.

Для описания вращательного движения судна выбрано дифференциальное уравнение третьего порядка, характеризующее изменение курса судна в зависимости от угла перекладки руля. В дальнейшем целесообразно разработать алгоритм расчета курса уклонении судна для расхождения с опасной целью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стебновский О.В. Формирование переходной траектории поворота судна / Стебновский О.В.// Автоматизация судовых технических средств. – 2010. – № 16. – С.92-95.
2. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение:Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 11. - Одесса: «ИздатИнформ», 2006 –С. 139 – 142.
3. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
4. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.