

С. В. Пашенцев

Управление процессом буксировки танкера средством регулирования натяжения троса

Автоматическое управление процессом буксировки осуществляется посредством воздействия на него управляемого параметра – натяжения троса, которое изменяется в зависимости от кинематических параметров движения судна. В качестве источника формирования управляющего сигнала можно выбрать различные кинематические характеристики движения буксируемого судна: угол отклонения буксирного троса от диаметральной плоскости (ДП); угол дрейфа; угловую скорость поворота судна при буксировке. В ходе исследования осуществлен доказательный выбор конкретной управляющей характеристики. С помощью указанной характеристики (при необходимости и ее производной) определяется закон управления, устраняющий устойчивые или развивающиеся автоколебания при действии начальных возмущений. В соответствии с этим законом выбираются из существующей патентной базы технически обоснованные конструктивные решения, способствующие совершенствованию способов буксировки морских объектов. Модельные решения выполнены для танкера проекта 214 RN (в балласте) на основе рассчитанной ранее математической модели. Основная задача состояла в решении системы четырех дифференциальных нелинейных уравнений первого порядка; в этом случае закон управления натяжением троса является просто пропорциональным. При усложнении закона управления до пропорционально-дифференциального (ПД) была расширена система дифференциальных уравнений до седьмого порядка; начальная система четвертого порядка дополнена тремя уравнениями для производных кинематических переменных задачи. В ходе отбора способов управления натяжением буксирного троса использована критериальная характеристика качества управления и выбрана средняя квадратическая характеристика углового отклонения буксирного троса от ДП буксируемого танкера.

Ключевые слова: буксировка, математическое моделирование, управление натяжением троса, закон управления ПД, критерий качества.

Введение

В настоящее время актуализируется проблема буксировки морского транспорта, что объясняется значительным ростом числа буксирных операций во всех районах Мирового океана. В особенности это утверждение справедливо для морских акваторий Севера Российской Федерации в связи с интенсивным освоением природных ресурсов прибрежных зон.

Следует отметить, что буксировка является одной из сложнейших операций, прежде всего с точки зрения ее безопасности, что обусловлено уникальностью обстоятельств каждой буксировки, недостаточной изученностью этого процесса и неполной обеспеченностью информацией о состоянии объектов в ходе буксировки.

Основной задачей, решаемой в процессе исследования, является оценка управляемости системы буксировки, которая включает буксир, буксируемый объект и гибкую буксирную связь между ними. Потеря устойчивости этой системы – главная причина аварий при буксировке. Одной из форм выхода подобной нелинейной системы из устойчивого состояния является возникновение автоколебаний, способы устранения которых рассматриваются в данной работе.

Материалы и методы

При исследовании процесса буксировки морских объектов наиболее сложной проблемой является возникновение автоколебаний буксируемого объекта, которые могут возникать под влиянием определенных факторов, таких как характеристики буксируемого объекта, буксира, буксирной связи; скорость буксировки; а также внешние условия – возмущения среды в виде ветра, волнения, течения и т. п. В той или иной мере указанные обстоятельства исследованы с разных точек зрения [1; 3, с. 144; 4–5]. Однако в этих исследованиях не рассматривался вопрос о регулировании процесса буксировки посредством изменения параметров самой буксирной связи: натяжения буксировочного троса и его длины. Их можно изменять, используя в качестве управляющего параметра одну из кинематических характеристик движения буксируемого объекта: угол θ отклонения троса от ДП буксируемого судна, угловую скорость ω его поворота или угол дрейфа β . Эффективным способом изучения такого управляемого процесса является компьютерное моделирование; построение математической модели судна представлено в работе [2, с. 141]. Дальнейшая работа по моделированию проведена в рамках вычислительной среды MathCad; выбраны три дифференциальных уравнения движения буксируемого судна [1], они дополнены дифференциальным уравнением кинематического характера для движения буксирного троса, рассматриваемого как стержень. Коэффициенты a_{kj} правых частей дифференциальных уравнений вычислены в соответствии с моделью, выполненной для танкера проекта 214 RN "Архангельск" (в балласте) как более склонного к автоколебаниям. Система решается

с помощью встроенной функции интегрирования `rkfixed()` с фиксированным шагом. При интегрировании использовались следующие исходные данные¹:

– параметры судна и его математической модели:

$$\left. \begin{aligned} F_{dp} &= 947 \quad L = 162 \quad V = 24\,912 \quad I_z = 39\,101\,650 \\ k_{11} &= 0.034 \quad k_{22} = 0.455 \quad k_{66} = 0.453 \\ m_{11} &= \rho \cdot V \cdot (1 + k_{11}) \quad m_{22} = \rho \cdot V \cdot (1 + k_{22}) \quad I_{zz} = I_z \cdot (1 + k_{66}) \\ C_{m\omega} &= 0.042 \quad C_{m\beta} = 0.076 \quad C_{y\beta} = 0.332 \quad C_{2y} = 0.286 \quad C_{y\omega} = 0.061 \\ N_p &= 0.5\rho v^2 F_{dp} \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

– характеристики руля танкера:

$$\left. \begin{aligned} A_r &= 27.4 \quad l_r = 80 \quad C_{yra} = 2.4 \quad \chi = 0.3 \\ N_r &= 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_r \quad f_r = C_{yra} \cdot \chi \cdot N_r \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

– коэффициенты дифференциальных уравнений a_{jk} :

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{N_p C_{m\omega} v L^2 + f_r l_r^2}{v \cdot I_{zz}} \quad a_{12} = \frac{N_p C_{m\beta} L - f_r l_r}{I_{zz}} \quad a_{13}(\theta) = \frac{T(\theta) x T L}{I_{zz}} \\ a_{21} &= \frac{m_{11} v - f_r l_r / v}{v m_{22}} \quad a_{22} = \frac{N_p}{v m_{22}} \quad a_{23}(\theta) = \frac{T(\theta)}{v m_{22}} \quad a_{222} = \frac{f_r}{v m_{22}} \\ a_{31} &= 1 + x T / \left(\frac{l}{L}\right) \quad a_{32} = \frac{v}{l} \quad a_{34} = \frac{v}{l} \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

– параметры буксирного троса и закон изменения его натяжения в зависимости от угла θ отклонения направления троса от диаметральной плоскости танкера, которое в значительной мере определяет степень рыскания танкера при буксировке, поэтому выбрано в качестве задающего параметра движения в законе управления процессом буксировки:

$$\left. \begin{aligned} xT &= 0.5 \quad l = 2 \cdot L \quad k\theta = 200 \quad T_0 = 100 \\ T(\theta) &= T_0 + k\theta \cdot \theta \cdot \text{sign}(\theta) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Детали задания коэффициентов уравнений и решения приведены в виде формул (1)–(3). Все величины имеют размерности Международной системы единиц (СИ), кроме водоизмещения судна V , приводимого традиционно в тоннах.

Результаты и обсуждение

Пропорциональный закон управления натяжением

В процессе исследований [3], а также на основании морской практики установлено, что увеличение натяжения троса уменьшает рыскание буксируемого судна. Закон регулирования выглядит как просто пропорциональный:

$$T(\theta) = T_0 + k\theta \cdot \theta \cdot \text{sign}(\theta), \quad (5)$$

где T_0 – некоторое постоянное значение натяжения; $k\theta$ – коэффициент усиления, функция знака $\text{sign}(\theta)$ добавлена для двусторонней реакции натяжения на угол отклонения θ , уменьшая или увеличивая натяжение в соответствующих случаях. Следует отметить, что при использовании закона управления натяжением троса (5) часть коэффициентов дифференциальных уравнений движения системы, которые зависят от регулируемого параметра, перестают быть константами; в данном случае это утверждение относится к коэффициентам a_{31} и a_{23} , они становятся функциями угла θ .

Следует решить систему дифференциальных уравнений, представленную в виде группы формул:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \omega \\ \omega_1 &= -a_{11} \cdot \omega + a_{12} \cdot \beta - a_{13}(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ \beta_1(\omega, \beta, \theta) &= a_{21} \cdot \omega - a_{22} \cdot (C_{y\beta} + C_{2y} \cdot \gamma \cdot |\sin(\beta)|) \sin(\beta) - a_{222} \cdot \sin(\beta) - a_{23}(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ \vartheta_1(\omega, \beta, \varphi) &= a_{13} \cdot \omega - a_{32} \cdot \beta + a_{34} \cdot \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

¹ Формулы вычислительной среды MathCad набраны и расположены таким образом, как они отражены на экране монитора, т. е. в виде снимков (скриншотов) экрана.

Решение системы уравнений (6) производится с помощью встроенной функции `rkfixed()` среды MathCad. Они записаны для наших кинематических переменных в следующем порядке: курс судна φ , угловая скорость поворота ω , угол дрейфа β , угол отклонения троса θ . Цифрой 1 обозначены первые производные соответствующих параметров (φ_1 – первая производная по времени от курса и т. д.). В синтаксисе MathCad эти переменные становятся компонентами вектора-столбца y , который в транспонированном виде выглядит так: $y^T = (y_0, y_1, y_2, y_3)$. Заданы начальные значения переменных; в качестве начального возмущения определена угловая скорость поворота $0.05 = 2.865$ °/с. Число шагов интегрирования выбрано равным 3000 (шаг равен одной секунде). Вектор производных задан вектором $D(t, y)$, в котором компоненты представлены функциями вектора переменных y . Обращение к функции интегрирования Рунге – Кутты $Z = \text{rkfixed}(y, 0, m, m, D)$ выполняет процедуру решения системы дифференциальных уравнений. Результаты решения размещаются в матрице Z , которая в данном случае состоит из пяти столбцов и 3001 строки. Первый столбец матрицы содержит текущее время интегрирования, остальные столбцы – кинематические переменные в указанном выше порядке. Эти этапы решения представлены следующей группой формул:

$$\left. \begin{aligned} m = 3000 \quad n = 0.m \\ y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \omega 1(y_1, y_2, y_3) \\ \beta 1(y_1, y_2, y_3) \\ \theta 1(y_1, y_2, y_0) \end{pmatrix} \\ Z = \text{rkfixed}(y, 0, m, m, D) \\ K 0_n = Z_{n,1} \quad \omega 0_n = Z_{n,2} \quad \beta 0_n = Z_{n,3} \quad \theta 0_n = Z_{n,4} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Ряд формул группы (7), расположенных в четвертой строке, из решения (матрицы Z) извлекает столбцы 1–5 с помощью присвоений их векторам с обозначениями наших переменных. Так, формула $\omega 0_n = Z_{n,2}$ означает запись третьего (счет с нуля) столбца матрицы Z в вектор $\omega 0$. Каждый элемент записывается с индексом n . После этого появляется возможность строить графики изменения основных кинематических характеристик, полученных в процессе такого моделирования буксировки танкера. На рис. 1 приведены графики изменения угловой скорости поворота $\omega\theta$, угла дрейфа $\beta 0$ и угла отклонения троса $\theta 0$ от ДП. Процесс автоколебаний не возникает ни по одной из этих характеристик, существенное начальное возмущение (~ 3 °/с) затухает, однако этот процесс затягивается (примерно до 2500 с). Данное регулирование натяжения представляется действенным и имеющим право на обсуждение с технической точки зрения.

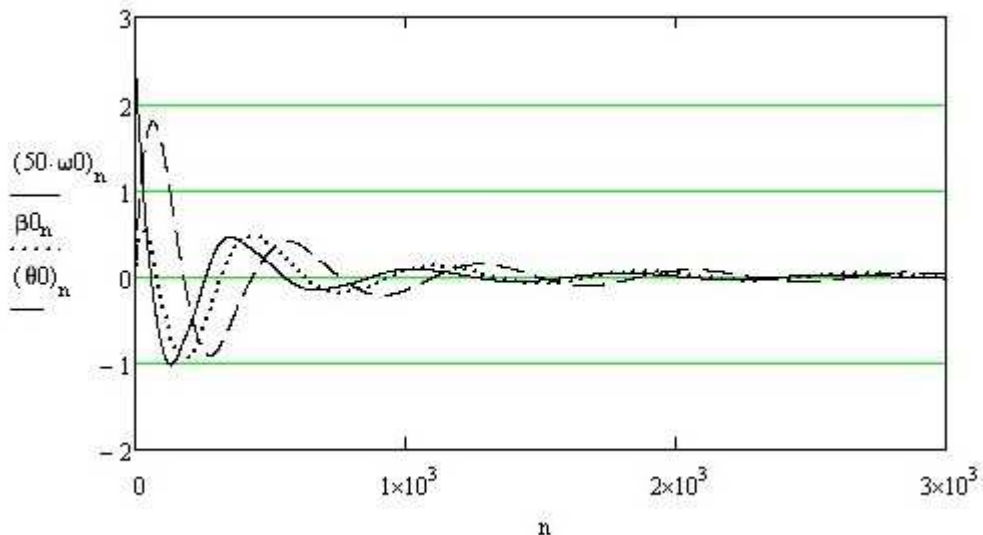


Рис. 1. Графики изменения кинематических характеристик, полученных в результате интегрирования ($T = 100$ кН, $k\theta = 0$)
 Fig. 1. The graphs of changes in kinematic characteristics obtained as a result of integration ($T = 100$ кН, $k\theta = 0$)

Возможные возражения о том, что процесс автоколебаний не возникнет и при отсутствии предлагаемого регулирования, опровергаются решением системы уравнений при нулевом коэффициенте

усиления $k\theta = 0$. Так, на рис. 2 показан характер изменения кинематических параметров движения в этом случае. Из графиков видно, что в системе возникают незатухающие колебания, более того, угол отклонения троса θ_0 (пунктирная линия) резко растет и выходит за пределы графического поля с выбранным масштабом изображения.

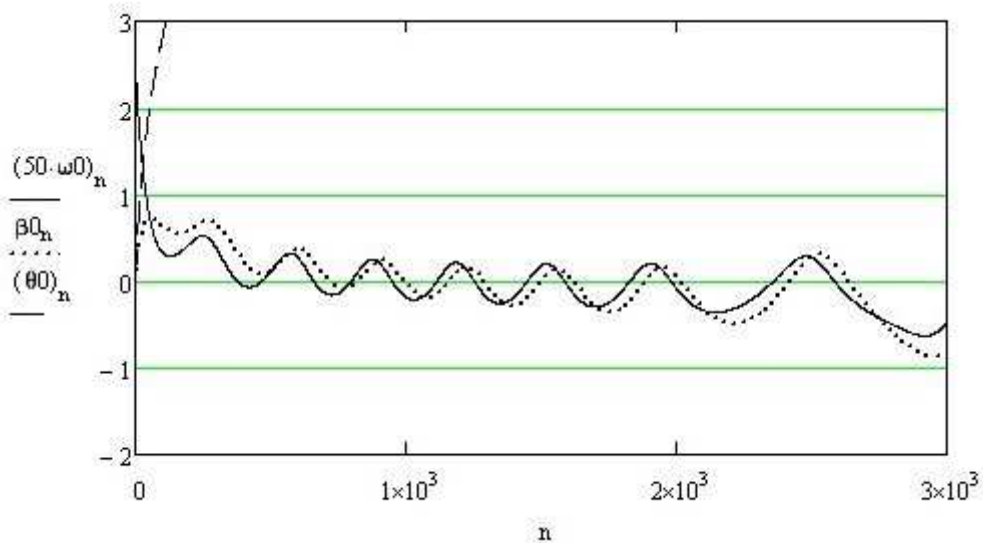


Рис. 2. Результаты интегрирования системы уравнений при отсутствии регулирования натяжения буксирного троса ($T_0 = 100$ кН, $k\theta = 0$)
 Fig. 2. The results of integrating the system of equations in the absence of regulation of the towing cable tension ($T_0 = 100$ кН, $k\theta = 0$)

Фазовый портрет на плоскости "угол отклонения θ_0 – скорость угла отклонения θ_s " показан на рис. 3. Данный график демонстрирует развивающийся процесс автоколебаний. Для сравнения: на рис. 4 приведен фазовый портрет в той же фазовой плоскости, когда натяжение троса регулировалось с коэффициентом усиления $k\theta = 200$, где отражена сходимость процесса к стационарной точке $(0, 0)$.

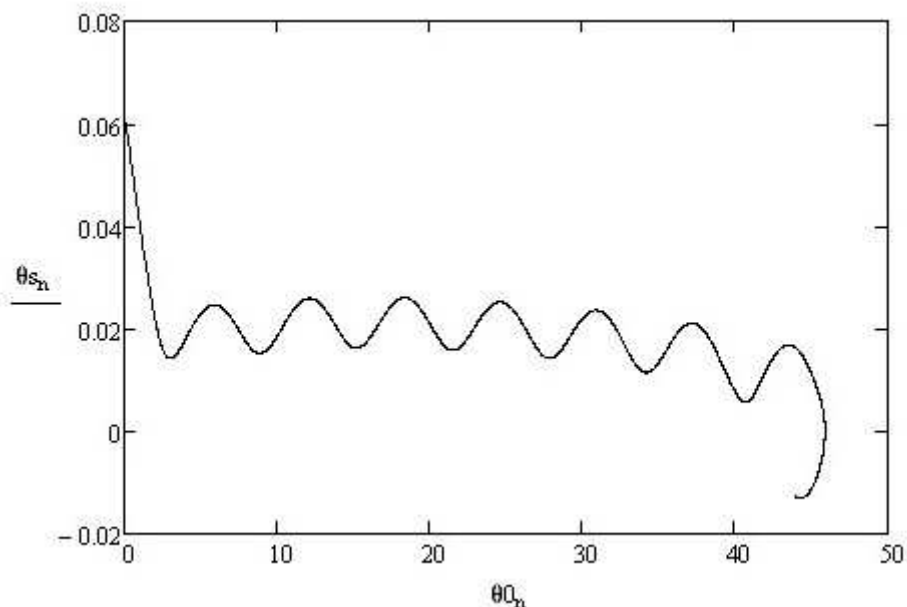


Рис. 3. Фазовый портрет на плоскости "угол отклонения θ_0 – скорость угла отклонения θ_s " при отсутствии регулирования натяжения троса ($k\theta = 0$)
 Fig. 3. The phase portrait on the plane "deflection angle θ_0 – velocity of deflection angle θ_s " in the absence of cable tension regulation ($k\theta = 0$)

Чтобы оценить количественно качество такого регулирования, введен показатель качества. Для этого выбрана средняя квадратическая характеристика отклонения угла θ для m точек интегрирования:

$$Q1 = \sqrt{\frac{\sum_n (\theta_{0n})^2}{m}}. \quad (8)$$

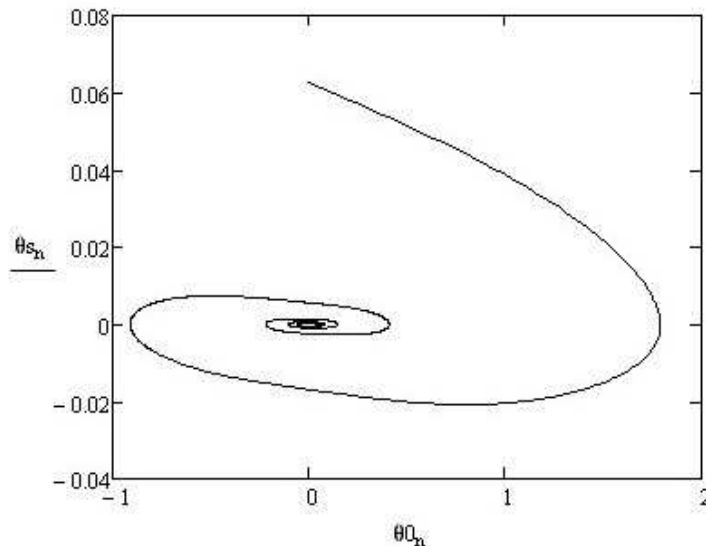


Рис. 4. Фазовый портрет на плоскости "угол отклонения троса θ_0 – скорость угла отклонения θ_s " при регулировании натяжения троса ($k\theta = 200$)

Fig. 4. The phase portrait on the plane "angle of deflection of the cable θ_0 – speed angle θ_s " when adjusting the cable tension ($k\theta = 200$)

Изменяя коэффициент усиления $k\theta$ и фиксируя показатель качества регулирования $Q1$, можно подобрать оптимальный коэффициент усиления в законе управления (5). Так, для нашего случая имеем следующие пары ($k\theta, Q1$): (100; 0.55), (200; 0.373) и (300; 0.303). Формально показатель $Q1$ убывает (качество растет) с увеличением коэффициента усиления, но в начальные моменты процесса начинают расти значения натяжения, определяемые законом управления. Следовательно, для сохранения целостности буксировочного троса следует остановиться на том значении $k\theta$, при котором натяжение не превышает допустимые значения.

График изменения натяжения троса в зависимости от времени приведен на рис. 5. Коэффициент регулирования равен 200, а максимальное натяжение не превышает 500 кН.

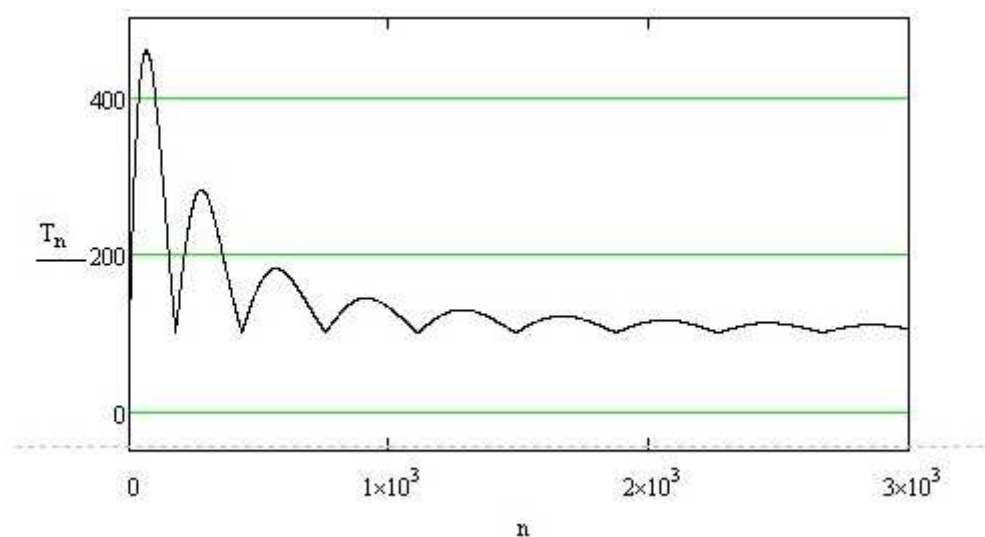


Рис. 5. Изменение натяжения троса в процессе его регулирования ($T_0 = 200$ кН, $k\theta = 200$, показатель качества регулирования $Q1 = 0.373$)

Fig. 5. Changing the tension of the cable during its regulation ($T_0 = 200$ kN, $k\theta = 200$, quality control indicator $Q1 = 0.373$)

Для продолжения дальнейшего исследования в этом направлении можно ввести комплексный показатель качества $Q2$, в который также входит значение натяжения троса:

$$Q2 = \sqrt{\frac{\sum^n [\rho1(\theta0_n)^2 + \rho2(T_n)^2]}{m}}. \tag{9}$$

При использовании указанного показателя также возникают проблемы, требующие отдельного изучения. Одной из них является выбор весовых коэффициентов $\rho1$ и $\rho2$, которые определяют долю каждого показателя (угла отклонения θ или натяжения троса T) в общем показателе качества $Q2$. Минимизируя этот показатель качества управления, можно одновременно добиться малых отклонений троса и допустимых нагрузок на буксировочный трос.

Пропорционально-дифференциальный закон управления натяжением

Для решения проблемы улучшения показателей регулирования каким-то иным способом, а не только за счет увеличения коэффициента усиления в законе (5), логично обратиться к обычной практике и усложнить закон управления, например, введя в него производную θ_s угла отклонения троса θ . Тогда закон управления (5) примет следующий вид:

$$T(\theta) = T0 + k\theta \cdot \theta \cdot \text{sign}(\theta) + k\theta_s \cdot \theta_s \cdot \text{sign}(\theta_s). \tag{10}$$

Реализация закона (10) в рамках интегрирования системы дифференциальных уравнений с помощью средств MathCad требует особой подготовки. Дело в том, что в уравнениях группы (6) нет переменных (производных), а включены только производные в виде функций в левых частях дифференциальных уравнений. Поэтому для реализации управления (10) средствами MathCad следует усложнить систему уравнений, введя в нее три уравнения и три переменные (производные): $\omega_s = d\omega/dt$, $\beta_s = d\beta/dt$ и $\theta_s = d\theta/dt$. Вводить производную курса не следует, так как его производная есть угловая скорость поворота. Данные преобразования представлены тремя группами формул:

$$\left. \begin{aligned} T(\theta, \theta_s) &= T0 + k\theta \cdot \theta \cdot \text{sign}(\theta) + k\theta_s \cdot \theta_s \cdot \text{sign}(\theta_s) \\ Ts(\theta, \theta_s) &= k\theta \cdot \theta_s \cdot \text{sign}(\theta) \end{aligned} \right\}; \tag{11}$$

$$\left. \begin{aligned} \phi1(\omega) &= \omega \\ \omega1(\omega, \beta, \theta, \theta_s) &= -a11 \cdot \omega + a12 \cdot \beta - \frac{T(\theta, \theta_s) \cdot xTL}{Izz} \sin(\theta) \\ \beta1(\omega, \beta, \theta, \theta_s) &= a21 \cdot \omega - a22(Cy\beta + C2y \cdot \gamma \cdot |\sin(\beta0)| \cdot \cdot) \sin(\beta) - a222 \sin(\beta) - \frac{T(\theta, \theta_s)}{m22 \cdot v} \sin(\theta) \\ \vartheta1(\omega, \beta, \varphi) &= a13 \cdot \omega - a32 \cdot \beta + a34 \cdot \varphi \end{aligned} \right\}; \tag{12}$$

$$\left. \begin{aligned} \omega2(\omega, \theta, \omega_s, \beta_s, \theta_s) &= -a11 \cdot \omega_s + a12 \cdot \beta_s - \frac{T(\theta, \theta_s) \cdot xT \cdot L}{Izz} \cos(\theta) \theta_s - \frac{Ts(\theta, \theta_s) \cdot xT \cdot L}{Izz} \sin(\theta) \\ \vartheta2(\omega_s, \beta_s, \omega) &= a13 \cdot \omega_s - a32 \cdot \beta_s + a34 \cdot \omega \\ TT(\beta, \beta_s, \theta, \theta_s) &= \frac{T(\theta, \theta_s)}{m22 \cdot v} \cos(\theta) \theta_s + \frac{T(\theta, \theta_s)}{m22 \cdot v} \sin(\theta) + a222 \cos(\beta) \beta_s \\ \beta2(\omega, \beta, \theta, \omega_s, \beta_s, \theta_s) &= a21 \cdot \omega_s - a22 \cdot (Cy\beta + C2y \cdot \gamma \cdot |\sin(\beta0)| \cdot \cdot) \cos(\beta) \beta_s - TT(\beta, \beta_s, \theta, \theta_s) \end{aligned} \right\}; \tag{13}$$

$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, y) = \begin{pmatrix} \phi1(y)_1 \\ \omega1(y_1, y_2, y_3, y_4) \\ \beta1(y_1, y_2, y_3, y_4) \\ \vartheta1(y_1, y_2, y_0) \\ \omega2(y_1, y_3, y_4, y_5, y_6) \\ \beta2(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6) \\ \theta2(y_4, y_5, y_1) \end{pmatrix}. \tag{14}$$

В указанных формулах вторые производные от кинематических характеристик обозначены цифрой 2: ω_2 – вторая производная угловой скорости; β_2 – угла дрейфа; θ_2 – угла отклонения троса. Их выражения получены простым дифференцированием по времени правых частей первых производных ω_1 , β_1 и θ_1 . В формулах (11) показан сам закон управления (10) и производная от $T(\theta)$ в виде функции $T_s(\theta, \theta_s) = k\theta \cdot \theta_s \cdot \text{sign}(\theta)$, которая входит в пятое и седьмое уравнения новой дифференциальной системы. Уравнения (12) задают первые производные параметров, а формулы группы (13) – вторые производные. Начальный вектор переменных y и вектор правых частей системы $D(y, t)$ получили размерность, равную семи, и в $D(t, y)$ стали входить переменные y_0 – y_6 . В формулах группы (14) приведены начальное значение вектора y и вектор $D(t, y)$. Начальное возмущение по угловой скорости поворота сохранено на уровне 0.05 c^{-1} .

После формирования новой системы дифференциальных уравнений обращаемся к той же функции интегрирования `rkfixed()` и получаем решение в виде матрицы Z :

$$Z = \text{rkfixed}(y, 0, m, m, D).$$

Из матрицы Z выделяем семь кинематических параметров буксировки:

$$K0 = Z^{(1)}, \omega_0 = Z^{(2)}, \beta_0 = Z^{(3)}, \theta_0 = Z^{(4)}, \omega_{0s} = Z^{(5)}, \beta_{0s} = Z^{(6)}, \theta_{0s} = Z^{(7)}. \quad (15)$$

В отличие от подобной операции в формуле (7) здесь использована другая нотация столбца в виде его номера, показанного верхним индексом в косых скобках.

При этом коэффициенты усиления по углу отклонения θ и его производной θ_s взяты равными $k\theta = 50$, $k\theta_s = 60$. Они были выбраны (посредством перебора вариантов) как наиболее эффективные для управления, что подтверждает графическая часть решения (рис. 6). Из графиков видно, что угол дрейфа и угловая скорость поворота возвращаются к начальным нулевым значениям примерно за $1\ 000 \text{ с}$, а угол отклонения троса θ примерно за 800 с приходит к новому стационарному значению, т. е. танкер движется параллельно буксиру с постоянным смещением в боковом к траектории буксировки направлении. Данная ситуация знакома специалистам по буксировке морского транспорта.

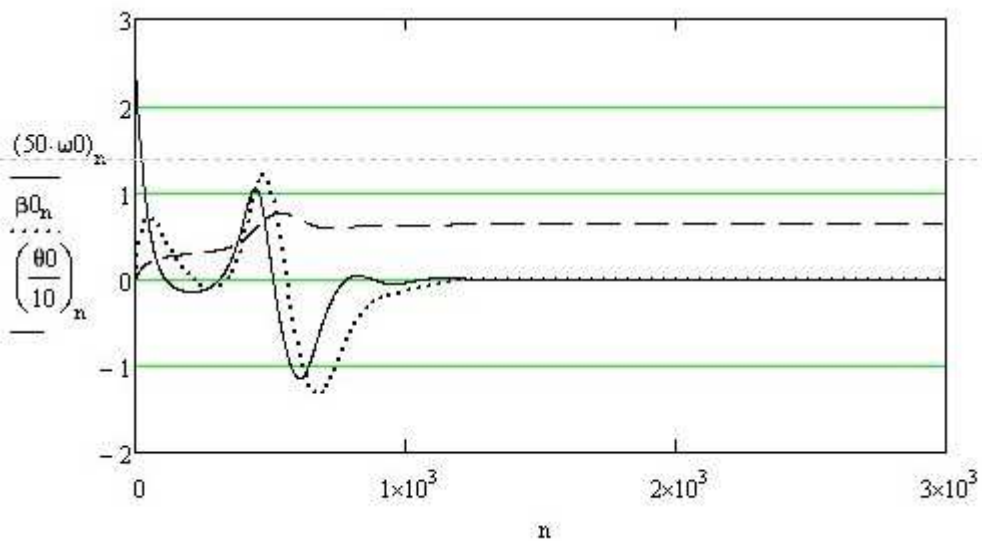


Рис. 6. Результаты интегрирования системы дифференциальных уравнений, полученные при использовании пропорционально-дифференциального закона регулирования натяжения троса ($T_0 = 100 \text{ кН}$, $k\theta = 50$, $k\theta_s = 60$)

Fig. 6. The results of integrating the system of differential equations obtained by using the proportional-differential law of cable tension control ($T_0 = 100 \text{ kN}$, $k\theta = 50$, $k\theta_s = 60$)

Графики изменения регулируемого натяжения троса и скорости изменения угла отклонения троса, представленной в законе регулирования (10), изображены на рис. 7. Верхние графики отражают изменение постоянного регулируемого натяжения T_0 , представляющего собой сумму двух переменных составляющих этого натяжения: одна из них формируется с помощью угла отклонения θ , другая – с помощью скорости изменения этого угла θ_s . Поэтому на рис. 7 (верхние графики) показаны три кривые (одна отражает натяжение троса, две других – указанные составляющие). После возникновения возмущения (в первые моменты

движения буксировочной системы) значительную роль в регулировании натяжения играет именно третья составляющая закона (10), определяемая скоростью изменения угла отклонения θ_s . Характер ее изменения представлен на рис. 7 (нижний график).

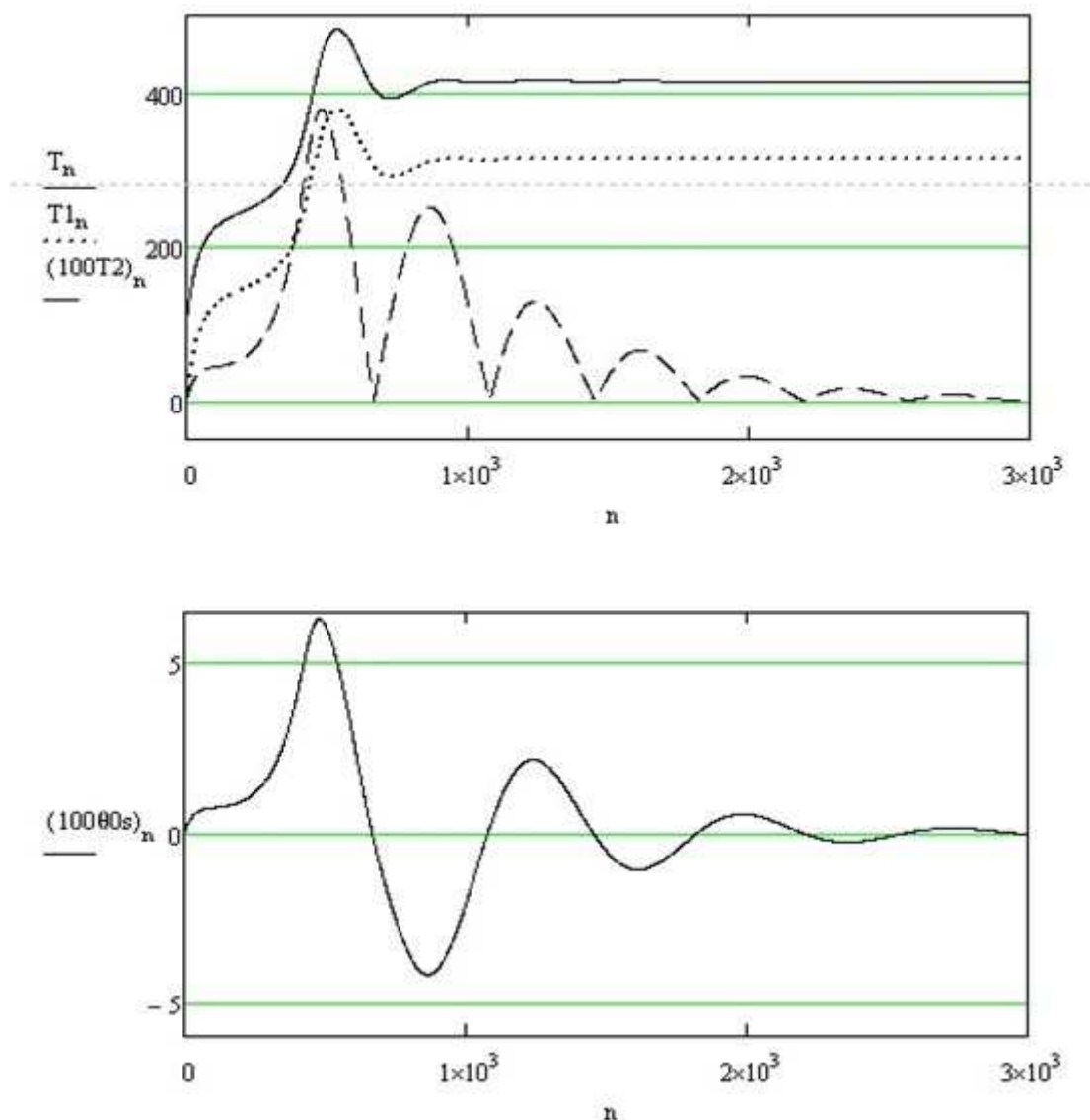


Рис. 7. Изменение во времени регулируемого натяжения троса T и двух его составляющих $T1$ и $T2$ (верхние графики) и скорость θ_s изменения угла отклонения троса, используемая в законе регулирования (нижний график)
 Fig. 7. The time variation of the adjustable tension cable T and its two compounds $T1$ and $T2$ (top) and the speed θ_s of changing the cable deflection angle used in the law of regulation (bottom)

Таким образом, влияние увеличения натяжения буксирного троса на характер движения буксируемого судна в достаточной степени изучено; созданы различные буксировочные лебедки, реализующие этот эффект. В настоящее время возникла необходимость моделирования указанного эффекта, в ходе которого уточняется действие фактора натяжения троса и устанавливаются параметры движения буксировочной системы, определяющие качество этого процесса (например, координата точки крепления троса xT). Решение дифференциальных уравнений движения с введением в них законов управления натяжением троса способствует изучению влияния натяжения с разных точек зрения, определению направления дальнейших исследований процессов буксировки, не самых простых в морской практике. В среде MathCad оказалось возможным нарастить систему дифференциальных уравнений движения с четырех уравнений (7) до семи (14), что позволило ввести в решения не только пропорциональный закон управления натяжением троса (5), но и пропорционально-дифференциальный закон (10), и сравнить их по эффективности. При решении проблемы с использованием закона (10) с учетом определенного сочетания коэффициентов усиления по углу отклонения и его скорости

появляется интересный эффект быстрого затухания автоколебаний, возникающих в результате начального возмущения по угловой скорости поворота; при этом угол отклонения троса получает новое (скачкообразно изменившееся) установившееся значение.

Выводы

Проведенные исследования и представленные результаты в численной и графической формах свидетельствуют о том, что введение в процесс моделирования буксировки законов управления натяжением троса по углу отклонения троса от ДП танкера дает безусловный эффект, не позволяя танкеру перейти в стадию автоколебательных движений. Это утверждение, естественно, относится к тем случаям, когда отсутствие подобного управления ведет не только к переходу в автоколебания, но и их развитию.

Сравнение законов управления только по углу отклонения троса (5) и с включением в него скорости изменения такого угла (10) не выявляет особых преимуществ последнего. Меры по усложнению закона управления не окупаются практическим эффектом, хотя и приводят к интересным результатам, которые требуют дальнейших исследований.

Кроме законов управления (5) и (10), можно, в принципе, использовать аналогичные законы, применяя в качестве формирующего сигнала для управления угловую скорость поворота ω или угол дрейфа β (а не угол отклонения троса θ). Такие исследования ведутся на кафедре судовождения Мурманского государственного технического университета.

Библиографический список

1. Справочник по теории корабля : в 3 т. / под ред. Я. И. Войткунского. Л. : Судостроение, 1985. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. 542 с.
2. Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Идентификация математической модели судна. М. : Моркнига, 2015. 157 с.
3. Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Оценка безопасности буксирной операции методами математического моделирования. М. : Моркнига, 2015. 144 с.
4. Юдин Е. Б., Маковский А. Г. Анализ самопроизвольного рысканья буксируемых судов // Судостроение. 1975. № 4. С. 15–17.
5. Bernitsas M. M., Kekridis N. S. Simulation and stability of ship towing // International Shipbuilding Progress. 1985. V. 32, Iss. 369. P. 112–123. DOI: <https://doi.org/10.3233/isp-1985-3236901>.

References

1. Spravochnik po teorii korablya [Handbook on the theory of the ship] : v 3 t. / pod red. Ya. I. Voytkunskogo. L. : Sudostroyeniye, 1985. T. 3. Upravlyayemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. 542 p.
2. Yudin Yu. I., Pashentsev S. V. Identifikatsiya matematicheskoy modeli sudna [Identification of the mathematical model of the vessel]. M. : Morkniga, 2015. 157 p.
3. Yudin Yu. I., Pashentsev S. V. Otsenka bezopasnosti buksirnoy operatsii metodami matematicheskogo modelirovaniya [Safety assessment of a towing operation using mathematical modeling methods]. M. : Morkniga, 2015. 144 p.
4. Yudin Ye. B., Makovskiy A. G. Analiz samoproizvol'nogo ryskan'ya buksiruyemykh sudov [Analysis of the spontaneous yaw of towed vessels] // Sudostroyeniye. 1975. N 4. P. 15–17.
5. Bernitsas M. M., Kekridis N. S. Simulation and stability of ship towing // International Shipbuilding Progress. 1985. V. 32, Iss. 369. P. 112–123. DOI: <https://doi.org/10.3233/isp-1985-3236901>.

Сведения об авторе

Пашенцев Сергей Владимирович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. физ.-мат. наук, профессор;
e-mail: serpass15@yahoo.com

Pashentsev S. V. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Phys.-Math. Sci., Professor; e-mail: serpass15@yahoo.com

S. V. Pashentsev

Managing the process of tanker towing by regulating the cable tension

Automatic control of the towing process is carried out through the impact of a controlled parameter on it – the cable tension which varies depending on the kinematic parameters of the vessel's motion. As a source of formation of the control signal, one can choose various kinematic characteristics of the towed vessel movement: the angle of deviation of the towing cable from the center line (DP); the drift angle; the angular speed of rotation of the vessel while towing. In the course of the study, an evidence-based choice of a specific control characteristic has been made. With the help of this characteristic (and its derivative if necessary), the control law is determined eliminating stable or developing self-oscillations under the action of initial perturbations. In accordance with this law, technically sound design solutions are selected from the existing patent base to help improve the methods of towing marine objects. Model solutions have been made for the project 214 RN tanker (in ballast) based on a previously calculated mathematical model. The primary problem is to solve a system of four first-order differential nonlinear equations; in this case the law of cable tension control is simply proportional. With the complication of the control law to the proportional-differential (PD), it was necessary to expand the system of differential equations to the seventh order; the initial system of the fourth order is supplemented by three equations for the derivatives of the kinematic variables of the problem. During the selection of methods for controlling the towline tension, the criterial characteristic of the control quality has been used and the mean square characteristic of the angular deviation of the towline from the PD of the towed tanker has been selected.

Key words: towing, mathematical modeling, cable tension control, PD control law, quality criterion.