

- Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012104.
12. *Hua C.* Reachable set modeling and engagement analysis of exoatmospheric interceptor / C. Hua, L. Yangang, C. Lei, T. Guojin // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – 27(6). – P. 1513 – 1526.
13. *Kondratyev S.I.* Human-machine system as a control shell in the implementation of mooring operations / S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan, V.V. Popov, A.E. Slitsan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012045
14. *LaValle S.M.* Planning Algorithms / S.M. LaValle. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
15. *Mitchell I. A.* Time-Dependent Hamilton–Jacobi Formulation of Reachable Sets for Continuous Dynamic Games / Ian M. Mitchell, Alexandre M. Bayen, Claire J. Tomlin // IEEE transactions on automatic control. – 2005. – Vol. 50, No. 7. – P. 947 – 957.
16. *Shima T.* UAV Cooperative Decision and Control / T. Shima, S. Rasmussen. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009 – 164p.
17. *Wu A.* Guaranteed Avoidance of Unpredictable, Dynamically Constrained Obstacles using Velocity Obstacle Sets / A. Wu. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011 – 116p.

УДК 656.618.1: [629.5.018.712:517.958]

DOI: 10.34046/aumsuomt105/3

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ БУКСИРУЕМОГО СУДНА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ И ДЛИНЫ БУКСИРНОГО ТРОСА

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор*

*Г.Ю. Ищейкин, соискатель*

В статье представлен анализ способов управления параметрами движения буксируемого судна, входящего в состав буксирной системы, посредством регулирования натяжения и (или) длины буксирного троса в процессе выполнения буксирной операции. Анализ выполнен по результатам модельных экспериментов с использованием математической модели буксируемого судна и буксирного троса. На основании системного анализа процесса движения буксируемого судна, выявлены основные зависимости значений кинематических параметров его движения при регулировании натяжения и длины буксирного троса, а также установлен наиболее эффективный способ регулирования.

**Ключевые слова:** буксирная операция, буксируемое судно, буксирный трос, натяжение троса, управляемость судна

## CONTROLLING THE MOVEMENT OF A TOWED VESSEL BY CHANGING THE TENSION AND LENGTH OF THE TOWLINE

*Yudin Yu.I., Ishcheikin G.Yu.*

The article presents an analysis of ways to control the motion parameters of a towed vessel, which is part of the towing system, by adjusting the tension and (or) length of the towing cable during the towing operation. The analysis is based on the results of model experiments using a mathematical model of a towed vessel and a towing cable. Based on a systematic analysis of the process of movement of a towed vessel, the main dependences of the values of the kinematic parameters of its movement were identified when adjusting the tension and length of the towing cable, and the most effective method of regulation was established.

**Key words:** towing operation, towed vessel, towing cable, cable tension, vessel controllability

### Введение

Буксирная операция (буксировка) – одна из сложнейших судовых ключевых операций, выполнение которой сопряжено с высокой степенью риска аварии или, как минимум, аварийного происшествия.

Из этого следует, что совершенствование способов управления движением буксирной системы (буксирующее судно - буксирный трос - буксируемое судно) одна из важнейших задач, решение которой будет способствовать обеспечению безопасности судовождения в процессе выполнения буксирных операций. В большинстве работ, касающихся процедуры выполнения буксирной операции и обеспечения безопасности судовождения в процессе её выполнения, авторы, в

основном, ссылаются на практический опыт, который, как известно, не может охватить все возможные варианты буксирных операций (состав буксирной системы, внешние факторы и пр.).

Безусловно, эмпирические способы оценки влияния различных факторов, определяющих степень безопасности буксирной операции и следующие из этого выводы и предложения по обеспечению этой безопасности, широко используются на практике. Тем не менее, именно практика свидетельствует о том, что этого недостаточно и, как следствие, требуется постоянное совершенствование способов и методов управления как буксирной системой в целом, так и отдельных ее элементов, в частности, буксируемым судном.

Безопасность выполнения буксирной операции во многом зависит от устойчивости движения буксируемого судна (объекта), его способности следовать по заданному маршруту буксировки с минимальными отклонениями от него. К сожалению, решению этой задачи уделялось недостаточно внимания, предпочтение отдавалось изучению и совершенствованию управления буксирующим судном [2], [3], [4]. Некоторые результаты в направлении исследования управления буксируемым судном были получены в работах отечественных [5], [7], [8] и зарубежных авторов [9], [10], [11], [12]. Предложенный группой авторов новый способ управления движением буксирной системы [1] вызвал необходимость проведения дальнейших исследований для решения задачи обеспечения устойчивости движения буксируемого судна посредством автоматического изменения натяжения и (или) длины буксирного троса. При этом указанные исследования должны быть сориентированы на применение современных достижений технического прогресса в направлении совершенствования существующих и создания новых образцов технических средств, используемых на морском транспорте.

Очевидно, что выполнение любых исследований, связанных с определением безопасных способов буксировки плавучих объектов морем, необходимо провести анализ динамики движения буксируемого судна. Указанный анализ можно проводить как на основе результатов натурного эксперимента, так и с использованием результатов модельного эксперимента. При этом следует иметь в виду, что натурный эксперимент, как правило, очень дорогостоящий, особенно если требуется оценка влияния многочисленных факторов на характер движения буксируемого судна, поэтому выбрана более простая и, что самое главное, менее затратная методика решения поставленной задачи, суть которой заключается в проведении ряда модельных экспериментов с использованием идентифицированной известными способами [6] математической модели движения буксируемого судна.

#### Управление движением буксируемого судна изменением натяжения буксирного троса

Моделированием согласованного изменения натяжения троса и его длины, решены ряд задач с использованием оригинальной программы регулирования указанных параметров [8]. Однако конечная цель представленных здесь исследова-

ний стоит в том, чтобы смоделировать систему автоматического регулирования натяжения и (или) длины троса в соответствие с известным способом [1]. Для этого вернемся к одиночному (а не пакетному [8]) решению задачи и введем некоторые изменения в дифференциальные уравнения, описывающие динамику буксируемого судна и буксирного троса:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= -a_{11} \times \omega + a_{12} \times \beta - a_{13} \times \theta \\ \frac{d\beta}{dt} &= a_{21} \times \omega - a_{22} \times \beta - a_{23} \times \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= a_{31} \times \omega - a_{32} \times \beta + a_{34} \times \psi \\ \frac{d\psi}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$ ,  $\beta$ ,  $\psi$  – угловая скорость, угол дрейфа, курс буксируемого судна, соответственно;  $\theta$  – угол отклонения буксирного троса от диаметральной плоскости (ДП) буксируемого судна;  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{21}$  ...  $a_{32}$ ,  $a_{34}$  – параметры уравнений.

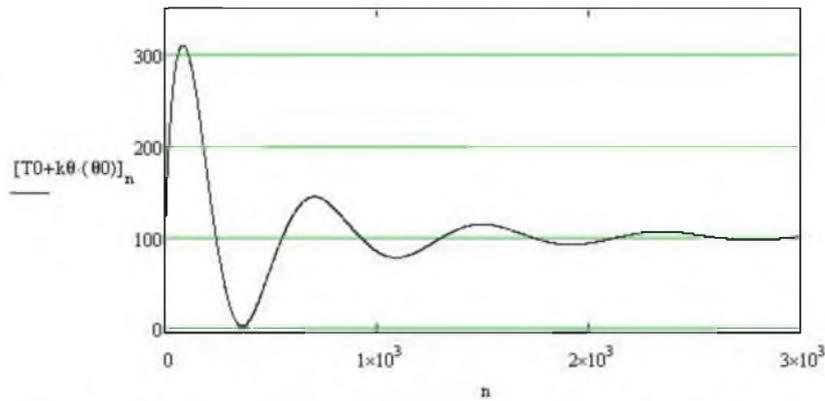
Представим натяжение  $T$  как функцию, скажем, угла  $\theta$  отклонения буксирного троса от диаметральной плоскости (ДП) буксируемого судна. Запишем это в такой форме

$$T(\theta) = T_0 + k_\theta \theta \times \text{sign}(\theta) \quad (2)$$

Такое изменение тяги в процессе буксировки означает, что начальное значение тяги  $T_0$  будет изменяться согласно изменению угла отклонения с учетом знака этого отклонения за счет множителя  $\text{sign}(\theta)$ . При этом коэффициент усиления  $k_\theta$  определяет силу зависимости управляющего слагаемого в (2) и самого угла отклонения  $\theta$ . Естественно, что мы подберем его опытным путем в процессе моделирования. Сделав натяжение троса функцией угла, мы должны изменить и два коэффициента уравнений  $a_{13}$  и  $a_{23}$ , куда входит натяжение  $T$ .

Приведем скриншот в виде рисунка 1, где произведены указанные изменения. В первой строке заданы значения начального натяжения  $T_0 = 350$  кН и значение коэффициента усиления  $k_\theta = 110$  (оно было подобрано). Чтобы показать эффект действия именно управления, мы взяли вначале коэффициент усиления равным нулю  $k_\theta = 0$  (нет управления), произвели решение и получили графики результатов в виде скриншота (рисунок 2). Система демонстрирует неустойчивость, особенно по углу отклонения троса  $\theta$ .




 Рисунок 4 – Изменение управляющего натяжения  $T(\theta)$  троса в процессе буксировки

Изменяя коэффициент усиления в законе управления можно оценить его эффективность. Это можно сделать с помощью критерия типа среднего квадратического отклонения на одну точку интегрирования. Например, можно сделать это для угла отклонения от ДП буксируемого судна, по которому мы и производим управление. Учитывая, что среднее значение этого угла равно нулю, как тривиальное решение задачи, критерий будет иметь следующий вид:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^m (\theta_0 - \theta_n)^2}{m}} \quad (3)$$

Изменяя коэффициент усиления, и получая значения критерия  $Q_1$ , заполним небольшую таблицу 1.

Таблица 1

$k_\theta$	50	100	150	200
$Q_1$	0.662	0.466	0.385	0.337
$\Delta Q_1 / \Delta k_\theta$	-	3.92%	0.2%	0.1%

Можно вводить аналогичные критерии по другим характеристикам движения, например, по углу дрейфа буксируемого судна  $\beta$  или по его угловой скорости  $\omega$ , но они не изменяют принципиальных подходов и выводов. Главный вывод, который мы можем сделать, это утверждать принципиальную управляемость процессом буксировки при автоматическом изменении натяжения троса в зависимости от угла отклонения троса от ДП буксируемого судна.

Само качество этого управления можно улучшать, вводя в закон управления (2) производную изменения угла отклонения ( $d\theta/dt$ ). Однако в рамках среды MathCad это сделать не удастся даже введением второй производной от угла  $\theta$ , так как заклинивается задание натяжения буксирного троса  $T$  и коэффициентов дифференциальных уравнений (1)  $a_{13}$  и  $a_{23}$ .

Далее рассмотрим управление процессом движения буксируемого судна путем изменения

натяжения троса  $T$  с помощью угловой скорости  $\omega$ . Это вполне приемлемое с точки зрения технического исполнения управление, так как угловая скорость  $\omega$  измеряется на современных судах, а её значение может быть использовано в целях управления. Существующие приборные способы измерения значения угловой скорости выгодно отличаются регулированием натяжения буксирного троса с учетом её значения от аналогичного регулирования с использованием значения угла отклонения буксирного троса от ДП буксируемого судна. В данном случае закон управления натяжением буксирного троса будет выглядеть следующим образом:

$$T(\omega) = T_0 + k_\omega \omega \times \text{sign}(\omega) \quad (4)$$

Структура программы моделирования почти не изменяется, поэтому здесь она не приводится, результаты моделирования с использованием закона управления натяжением буксирного троса представлены в графической форме представлены на рисунках 5 и 6. В частности, на рисунке 5, приведены графики изменения кинематических параметров движения буксируемого судна в процессе буксировки.

Из представленных графических зависимостей  $\omega(t)$ ,  $\beta(t)$ ,  $\theta(t)$  видно, что регулирование натяжения буксирного троса имеет определённый эффект, и колебательное движение буксируемого судна носит затухающий характер. На рисунке 6 показано изменение натяжения буксирного троса  $T(t)$  в процессе его регулирования с учетом угловой скорости буксируемого судна. Коэффициент усиления по угловой скорости при этом выбран равным  $k_\omega = 10000$ . Это естественно, так как сама угловая скорость  $\omega$  мала по отношению к другим кинематическим параметрам движения буксируемого судна, например, на рисунке 5 она представлена с пятидесятикратным увеличением.

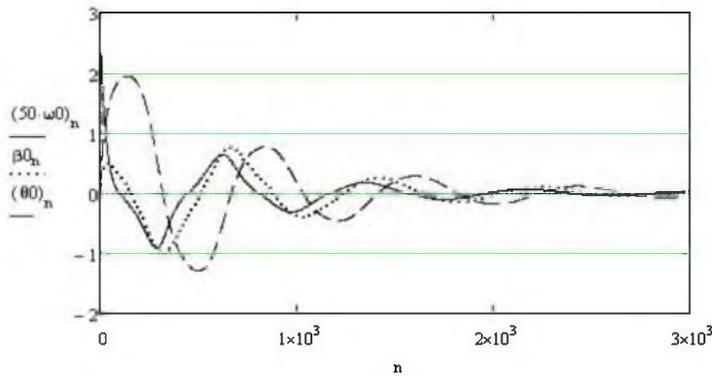


Рисунок 5 – Изменение во времени кинематических параметров движения буксируемого судна при управлении натяжением троса с помощью угловой скорости  $\omega$  ( $k_\omega = 10000$ )

$$T_{\text{трос}} = T(\omega_0)_n$$

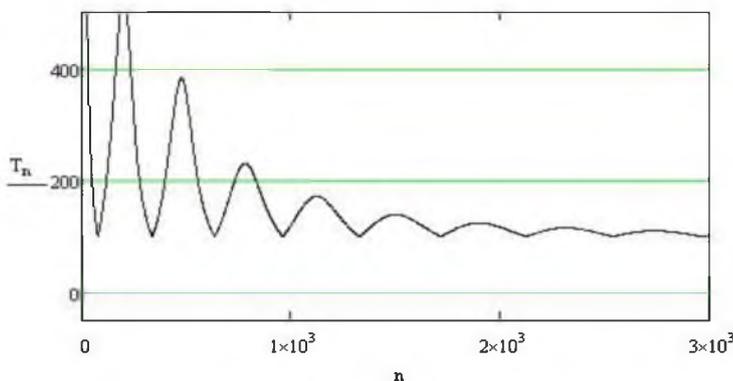


Рисунок 6 – Изменение натяжения троса в процессе регулирования по угловой скорости поворота  $\omega$

Выполнен расчет коэффициента эффективности управления  $Q_1$ , который уже использовался нами в предыдущем анализе управления по углу отклонения буксирного троса  $\theta$  от ДП буксируемого судна. Полученное значение  $Q_1$  при управлении натяжением буксирного троса по закону (4) с коэффициентом усиления  $k_\omega = 10000$ , равно 0.637, кстати, для коэффициента усиления  $k_\omega = 5000$ ,  $Q_1 = 1.0$ .

Сравнивая эти результаты с управлением по углу отклонения  $\theta$ , мы не видим существенной разницы: при использовании закона управления (2)  $Q_1 = 0.466$ , (4) -  $Q_1 = 0.637$ . Если коэффициент усиления взять равным 20000, то коэффициент эффективности управления  $Q_1 = 0.458$ , но при этом управляемое натяжение троса становится слишком большим, его значение достигает 700 кН, что достаточно близко к значению его разрывного усилия.

Наконец, можно построить систему управления натяжением троса с учетом значения угла дрейфа буксируемого судна. В настоящее время, при наличии на борту приемника систем спутниковой навигации, мы можем определить направление вектора линейной скорости судна  $\varphi$  в лю-

бой его заданной точке, и с использованием простой зависимости  $\beta = \psi - \varphi$  ( $\psi$  - курс судна) найти значение угла дрейфа  $\beta$ . Известное значение угла дрейфа  $\beta$  позволяет формировать закон управления натяжением буксирного троса в виде:

$$T(\beta) = T_0 + k_\beta \beta \times \text{sign}(\beta) \quad (5)$$

Как сказано выше, программа моделирования остается прежней, потому приводим только результаты моделирования в виде двух графиков, подобных графикам рисунков 5 и 6. Еще раз напомним, что поведение буксируемого судна без регулирования натяжения буксирного троса неустойчиво, как показано на рисунке 2. Графики изменения кинематических параметров движения буксируемого судна и натяжение буксирного троса во времени (рисунки 7 и 8, соответственно) демонстрируют результаты управления процессом буксировки с использованием значения угла дрейфа  $\beta$  буксируемого судна.

Видно, что управление нормализует неустойчивый процесс (см. рисунок 2), сводя его к стационарному поведению. Коэффициент усиления по углу дрейфа  $\beta$  выбран равным 400, при этом коэффициент эффективности управления

имеет значение  $Q_1 = 0.438$ . Если увеличить коэффициент усиления до 500, качество управления увеличивается и становится равным 0.388, но при

этом натяжение троса в процессе управления может достигать 600-700 кН, что может привести к его разрыву.

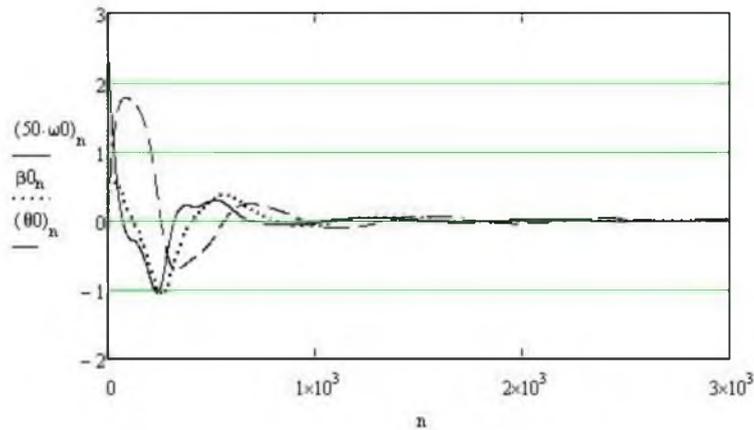


Рисунок 7 – Изменение во времени кинематических параметров движения буксируемого судна при управлении натяжением троса по углу дрейфа  $\beta$ , коэффициент усиления  $k_{\beta} = 400$

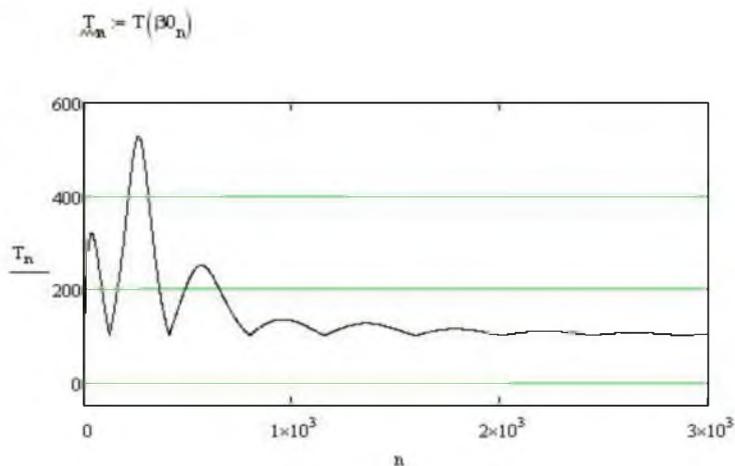


Рисунок 8 – Изменение натяжения троса в процессе регулирования по углу дрейфа  $\beta$

### Управление движением буксируемого судна изменением длины буксирного троса

Аналогичным образом проведены исследования возможности управления движением буксируемого судна путем изменения длины буксирного троса  $l$ . Процедура формирования законов управления такая же, как и в случае регулирования натяжения буксирного троса, т.е. рассмотрены три вида закона управления движением буксируемого судна регулированием длины буксирного троса:

$$\begin{aligned} l(\theta) &= l_0 + k_{\theta} \theta \times \text{sign}(\theta) \\ l(\omega) &= l_0 + k_{\omega} \omega \times \text{sign}(\omega) \\ l(\beta) &= l_0 + k_{\beta} \beta \times \text{sign}(\beta) \end{aligned} \quad (6)$$

Как видно, приведенные законы подобны законам управления (2), (4) или (5), но управляющим параметром становится длина троса  $l$ , а не натяжение троса  $T$ . Обозначение коэффициентов усиления  $k_{\theta}$ ,  $k_{\omega}$  и  $k_{\beta}$  оставлено без изменений, но

их величины в процессе моделирования, естественно, были несколько иными.

Покажем результаты моделирования управления длиной троса, начиная с угла отклонения  $\theta$  в качестве управляющего параметра, т.е. с первого закона управления в группе (6). Программа в среде MathCad выглядит как показано это на двух скриншотах (рисунок 9 и 10).

На рисунке 9 приведена начальная часть программы, где заданы коэффициенты дифференциальных уравнений, с учетом их изменения в зависимости от длины троса. Это коэффициенты  $a_{31}$ ,  $a_{32}$  и  $a_{34}$ , которые в данном случае являются функциями длины троса  $l$ . Она, в свою очередь, зависит от угла  $\theta$  отклонения троса от ДП буксируемого судна. Рисунок 10 демонстрирует решение системы дифференциальных уравнений для новых связей с использованием встроенной функции `rkfixed()` среды MathCad.

**Изменение длины троса по углу  $\theta$**

$$k_\theta = 500 \quad l_0 = 2L$$

$$k_T = 0.5 \quad T_{\omega} = 200$$

$$l(\theta) = l_0 + k_\theta \theta \cdot \text{sign}(\theta)$$

$$a_{11} = \frac{Np \cdot Cm \omega L^2 v + fr \cdot lr^2}{lzz \cdot v} \quad a_{12} = \frac{Np \cdot Cm \beta L - fr \cdot lr}{lzz} \quad a_{13} = \frac{T \cdot k_T L}{lzz}$$

$$a_{21} = \frac{m_{11} v - fr \cdot lr}{m_{22} v} \quad a_{22} = \frac{Np}{m_{22} v} \quad a_{23} = \frac{T}{m_{22} v} \quad a_{222} = \frac{fr}{m_{22} v}$$

$$a_{31}(\theta) = \left[ 1 + \frac{k_T}{\left( \frac{l(\theta)}{L} \right)} \right] \quad a_{32}(\theta) = \frac{v}{l(\theta)} \quad a_{34}(\theta) = \frac{v}{l(\theta)}$$

Рисунок 9 – Моделирование процесса буксировки при автоматическом изменении длины троса в зависимости от угла  $\theta$  (часть 1)

На графике того же рисунка показаны изменения основных кинематических параметров движения танкера  $\omega$ ,  $\beta$  и  $\theta$  при коэффициенте усиления в законе управления  $k_\theta = 500$ . При этом, как и ранее, оценивалось качество управления при помощи критерия  $Q_1$ . В данном случае он был равен 0.464. Вид и значение критерия  $Q_1$  и изменение длины троса в процессе регулирования приве-

дены на рисунке 11. Однако при выбранном коэффициенте усиления  $k_\theta$  в начальный момент длина троса достигает слишком больших значений (рисунок 11). Поэтому путем математического экспериментирования были подобраны другие значения коэффициента усиления, дающие худшие (большие) величины критерия  $Q_1$ , но изменяющие длину троса в реальных пределах.

$$\varphi_1(\omega) = \omega$$

$$\omega_1(\omega, \beta, \theta) = -a_{11} \omega + a_{12} \beta - a_{13} \sin(\theta)$$

$$\beta_1(\omega, \beta, \theta) = a_{21} \omega - a_{22} (C_1 \beta + C_2 \gamma - |\sin(\beta)|) \sin(\beta) - a_{222} \sin(\beta) - a_{23} \sin(\theta)$$

$$\theta_1(\omega, \beta, \theta, \varphi) = a_{31}(\theta) \omega - a_{32}(\theta) \beta + a_{34}(\theta) \varphi$$

$$m = 3000 \quad n = 0..m$$

$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.05 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{pmatrix} \quad D(t, y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \omega_1(y_1, y_2, y_3) \\ \beta_1(y_1, y_2, y_3) \\ \theta_1(y_1, y_2, y_3, y_0) \end{pmatrix}$$

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

$$\frac{KQ}{\omega_0 n} = Z_{n,1} \quad \omega_0 n = Z_{n,2} \quad \frac{\beta_0}{\omega_0 n} = Z_{n,3} \quad \theta_0 n = Z_{n,4}$$

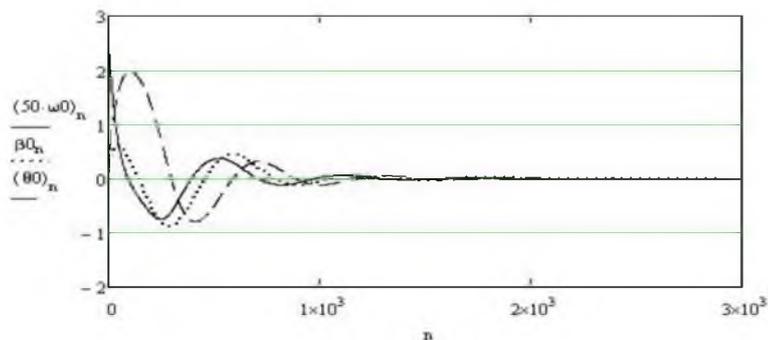


Рисунок 10 – Моделирование процесса буксировки при автоматическом изменении натяжения троса в зависимости от угла  $\theta$  (часть 2)

$$Q_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^m (\theta_{0n})^2}{m}} \quad Q_1 = 0.464$$

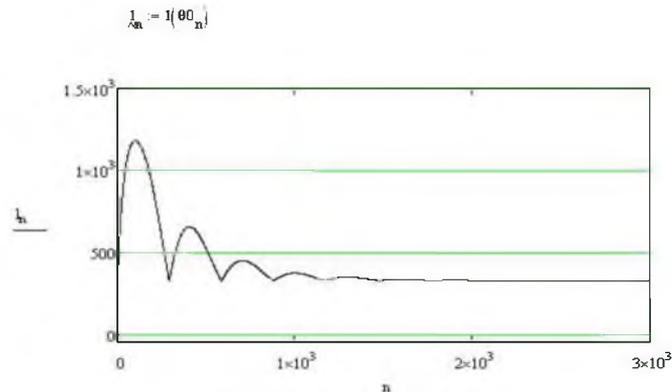


Рисунок 11 – Изменение длины троса в процессе регулирования по углу отклонения  $\theta$  ( $k_\theta = 500$ )

Приведем в качестве примера ряд таких пар, коэффициент усиления  $k_\theta$  – критерий качества  $Q_1$ : (250 – 0.503), (300 – 0.49) и (350 – 0.48). Увеличение коэффициента усиления улучшает критерий (уменьшает его), но при этом начальные вариации длины троса становятся слишком большими. Поэтому для дальнейшего моделирования можно остановиться на значении  $k_\theta = 300$  с соответствующим значением коэффициент эффективности управления  $Q_1 = 0.49$ .

Модельные исследования были выполнены для управления длиной троса с учетом значений Таблица 2

	Управление натяжением буксирного троса T			Управление длиной буксирного троса l		
	$\theta$	$\omega$	$\beta$	$\theta$	$\omega$	$\beta$
k усиления	110	10000	400	300	85000	250
Q <sub>1</sub> качество	0.466	0.637	0.438	0.49	0.627	0.618

### Сравнительная оценка способов регулирования параметров движения буксируемого судна

Сравнение управления процессом буксировки с помощью регулирования натяжения или регулирования длины троса удобно провести с помощью фазовых портретов кинематических параметров, используемых в решаемой задаче управления. В качестве примера сопоставления способов управления выбрана фазовая плоскость: «угол отклонения буксирного троса от ДП буксируемого судна ( $\theta$ ) – скорость изменения угла отклонения  $\dot{\theta}$ ». Приведем два таких фазовых портрета при управлении динамикой движения буксируемого судна с помощью длины троса  $l(\theta)$  и натяжения буксирного троса  $T(\theta)$ . Управляющим параметром в обоих случаях выбран сам угол отклонения  $\theta$  буксирного троса от ДП буксируемого судна.

угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости  $\omega$ . Качественно эти результаты повторяют все то, что показано на рисунках 9 и 10. Однако в каждом варианте управления длиной троса подбирается значение коэффициента усиления, которое дает приемлемые значения, как критерия качества управления, так и реальную длину буксировочного троса. Результаты таких решений, точнее выбранные средние значения коэффициентов усиления и критериев качества при разных вариантах управления процессом буксировки приведены в таблице 2.

Результаты построения фазовых портретов приведены на рисунке 12 при управлении длиной троса  $l$  и на рисунке 13 при управлении натяжением троса  $T$ . Интервал времени решения выбран одинаковым и в том и другом случае ( $t = 300$  с), средние значения длины троса и его натяжения в обоих случаях совпадают, т.е.  $l_0 = 2L$  ( $L$  – длина буксируемого судна),  $T_0 = 100$  кН). Видно, что при управлении натяжением троса система после начального возмущения быстрее приходит в стационарное состояние. Система на рисунке 13 уже неоднократно делает малые циклические движения вокруг стационарной точки  $(0, 0)$ , в то время, как система на рисунке 12 только подошла к стационарной точке. Хотя по критерию качества системы не слишком отличаются друг от друга. Фактически, фазовые портреты демонстрируют отличие быстродействий систем друг от друга в пользу системы управления по натяжению буксировочного троса.

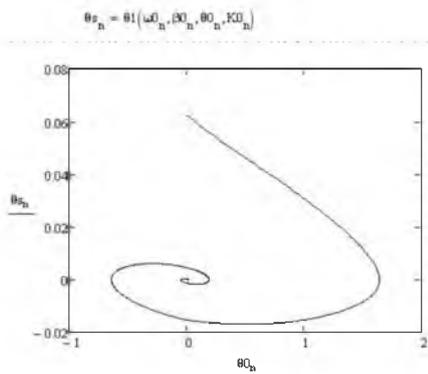


Рисунок 12 – Фазовая плоскость « $\theta - \theta_s$ » при управлении длиной троса

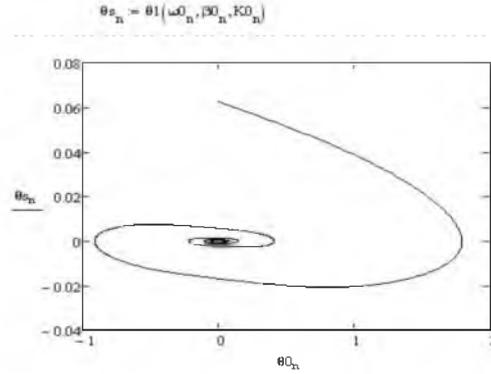


Рисунок 13 – Фазовая плоскость « $\theta - \theta_s$ » при управлении натяжением троса

Фазовые портреты в плоскостях других переменных принципиально не отличаются от приведенных фазовых пар « $\theta - \theta_s$ ». Обратим внимание, что производная угла отклонения троса  $\theta$  по времени обозначена нами как  $\theta_s$ . В верхней части каждого из рисунков 12 и 13 приведены соотношения, с помощью которых система MathCad находила эти производные. Делалось это с использованием правой части четвертого дифференциального уравнения системы уравнений, представленной в верхней части рисунка (1). Но в случае управления длиной троса (рисунок 12) эта зависимость включает сам угол  $\theta$ , поскольку от него зависит длина троса, входящая в это выражение. Поэтому производная выглядит как  $\theta_{s_n} = \theta_1(\omega_n, \beta_n, \theta_n, K0_n)$ , в то время как в случае управления натяжением троса производная не содержит угла  $\theta$  и выглядит так (рисунок 13):  $\theta_{s_n} = \theta_1(\omega_n, \beta_n, K0_n)$ .

### Заключение

Выполненные исследования с целью разработки систем автоматического управления процессом буксировки, а также предметный анализ их результатов, позволяют считать предпочтительным управление движением буксируемого судна с использованием регулирования натяжения буксирного троса. За управляющий параметр при этом можно выбирать любой из ряда рассмотренных в данной статье, а именно: угол отклонения буксирного троса от ДП буксируемого судна  $\theta$ , угловую скорость буксируемого судна  $\omega$  или его угол дрейфа  $\beta$ . Однако практическая сторона реализации этой идеи должна исходить об удобстве получения управляющего сигнала, исходить из того, какой из этих параметров измеряется с меньшими трудностями и большей точностью. Из самых общих соображений подобного рода можно рекомендовать угол дрейфа  $\beta$ , который определяется с помощью систем спутниковой навигации и гирокомпы. При этом результат выполненных таким образом измерений в цифровой

форме используется для формирования управляющего сигнала на автоматическую буксирную лебедку, выполняющую функции исполняющего механизма. Существующие на данный момент автоматические судовые буксирные лебедки решают не задачу управления, а задачу безопасности, уменьшая натяжение в тросе при превышении им некоторого установочного значения. Или подбирая трос при снятии напряжения в нем. В этой связи предложенные способы регулирования натяжения буксирного троса требуют определенных технических разработок, направленных на совершенствование системы управления автоматической буксирной лебедкой.

### Литература:

1. Патент 2615846 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/04 (2006.01). Способ управления движением буксирной системы / Юдин Ю.И., Власов А.В., Кайченев А.В., Висков А.Ю.; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т. – № 2015143563/15; заявл. 12.10.2015; опубл. 11.04.2017.
2. Справочник по теории корабля: В 3 т. Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / [А. Ш. Афремов и др.]; под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 542 с.
3. Юдин Е.Б. Анализ самопроизвольного рысканья буксируемых судов / Е. Б. Юдин А. Г. Маковский // Судостроение. – 1975. – № 4. – С. 15–17.
4. Юдин Е.Б. К расчету управляемости океанских буксиров / Е. Б. Юдин // Судостроение. – 1984. – № 7. С. 7–9.
5. Юдин Ю.И. Оценка безопасности буксирной операции методами математического моделирования: монография / Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев. – М.: Моркнига, 2015. – 144 с.
6. Юдин Ю.И. Идентификация математической модели судна / Юдин Ю.И., Пашенцев С.В. – М.: Моркнига, 2015. – С.141.
7. Юдин, Ю.И. Учет удлинения буксирного троса при моделировании процесса буксировки /

- Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин // Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – № 3. – С. 60-70.
8. Юдин, Ю.И. Моделирование изменений длины и натяжения троса в процессе выполнения буксирной операции / Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4. Т.4. – С. 8-12.
  9. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011a. Course stability of a ship towing system. *Ship Technol. Res. Schiffstechnik* 58 (1), 4–24.
  10. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Maimun, A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning. *Ocean Engineering* 99 (2015). 95-106.
  11. Varyani, K.S., Barltrop, N., Clelland, D., Day, A.H., Pham, X., Van Essen, K., Doyle, R., Speller, L., 2007. Experimental investigation of the dynamics of a tug towing a disabled tanker in emergency salvage operation. In: *International Conference on Towing and Salvage Disabled Tankers*, pp. 117–125.
  12. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsumoto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. *Jpn. Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 4, 137–146 (Japanese).
- References**
1. Patent. 2615846 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/04 (2006.01). Sposob upravleniya dvizheniem buksirnoj sistemy / YUdin YU.I., Vlasov A.V., Kajchenov A.V., Viskov A.YU.; zayavitel' i patentoobladatel' Murmanskij gos. tekhn. un-t. № 2015143563/15; zayavl. 12.10.2015; opubl. 11.04.2017.
  2. Spravochnik po teorii korablya: V 3 t. T. 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / [A. SH. Afremov i dr.]; pod red. YA. I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 542 s.
  3. YUdin E. B. Analiz samoproizvol'nogo ryskan'ya buksiruemyh sudov / E. B. YUdin A. G. Makovskij // *Sudostroenie*. – 1975. – № 4. – S. 15–17.
  4. YUdin E. B. K raschetu upravlyaemosti okeanskih buksirov / E. B. YUdin // *Sudostroenie*. – 1984. – № 7. S. 7–9.
  5. YUdin YU. I. Ocenka bezopasnosti buksirnoj operacii metodami matematicheskogo modelirovaniya: monografiya / YU. I. YUdin, S. V. Pashencev. – M.: Morkniga, 2015. – 144 s.
  6. YUdin YU.I. Identifikaciya matematicheskogo modeli sudna / YUdin YU.I., Pashencev S.V. – M.: Morkniga, 2015. – S.141.
  7. YUdin, YU. I. Uchet udlineniya buksirnogo trosa pri modelirovanii processa buksirovki / YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. – 2018. – № 3. – S. 60-70.
  8. YUdin, YU.I. Modelirovanie izmenenij dliny i natyazheniya trosa v processe vypolneniya buksirnoj operacii / YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. – 2020. – № 4. Т.4. – С. 8-12.
  9. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011a. Course stability of a ship towing system. *Ship Technol. Res. Schiffstechnik* 58 (1), 4–24.
  10. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Maimun, A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning. *Ocean Engineering* 99 (2015). 95-106.
  11. Varyani, K.S., Barltrop, N., Clelland, D., Day, A.H., Pham, X., Van Essen, K., Doyle, R., Speller, L., 2007. Experimental investigation of the dynamics of a tug towing a disabled tanker in emergency salvage operation. In: *International Conference on Towing and Salvage Disabled Tankers*, pp. 117–125.
  12. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsumoto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. *Jpn. Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 4, 137–146 (Japanese).

УДК 517.958: 656.61.052.08

DOI: 10.34046/aumsuomt105/4

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТАНКЕРА «NORDIC ARCTIC TANKER AT 19» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор*

Рассматриваемая в настоящей работе проблема идентификации математической модели судна легко погружается в общую проблему моделирования и идентификации моделей. С общих позиций основным содержанием науки можно признать формирование моделей того или иного типа на основе результатов наблюдений и исследования их поведения. Модели могут быть в разной степени формализованными, но все они обладают одним главным свойством – связывают наблюдения в некоторую общую картину. Решение задач построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением составляет предмет теории идентификации.

**Ключевые слова:** математическая модель, параметры модели, идентификация модели танкера.

## IDENTIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE TANKER "NORDIC ARCTIC TANKER AT 19" USING DATA FROM FIELD EXPERIMENTS

*Yudin Yu.I.*

The problem of identifying a mathematical model of a ship considered in this paper is easily immersed in the general problem of modeling and identifying models. From a general standpoint, the main content of science