

Научная статья
УДК 656.618.1.052
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-3-38-42>
EDN CVXKUE

Алгоритм стабилизации рыскания буксируемого судна

*Михаил Иосифович Якубович, Ольга Борисовна Кузнецова,
Ксения Вячеславовна Пеньковская[✉], Сергей Иванович Позняков*

*Мурманский арктический университет,
Мурманск, Россия, kseniamgtu@rambler.ru[✉]*

Аннотация. Буксировка является одной из сложных и рискованных задач судовождения, т. к. в этом случае задействовано два и более судна одновременно. Аварийных случаев, связанных с буксировкой, зафиксировано минимальное количество, однако они все еще происходят, остается вопрос повышения безопасности подобных операций. Многолетние исследования и практический опыт проведения буксирных операций подтверждает прямую зависимость безопасности их проведения от траектории движения буксируемого судна. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что недостатком существующих методов буксировки судов является рыскание буксируемого судна, приводящее к излишне большой потере в скорости даже при слабом волнении на море, что вызвано в основном наличием внешних возмущений. Доказано, что для повышения безопасности проведения буксирных операций необходима стабилизация рыскания буксируемого судна. Разработан алгоритм стабилизации курса судна, который позволяет решить задачу буксировки по заданной траектории. Алгоритм составлен на основе модели углового движения судна, которая оперирует угловой скоростью буксируемого судна и углом перекладки руля. Использована такая модель углового движения буксируемого судна, в которой этой скоростью можно управлять воздействиями от угла перекладки руля. При этом алгоритм стабилизации «сходится» к устойчивому курсу даже при наличии внешних существенных возмущений. Полученная математическая модель решается методом наименьших квадратов и способна как стабилизировать, так и минимизировать рыскание буксируемого судна. Предложенный эмпирический способ оценки устойчивости курса буксируемого судна может обеспечить дополнительную навигационную безопасность буксирных операций.

Ключевые слова: алгоритм стабилизации, безопасность буксирных операций, буксировка судна, рыскание буксируемого судна, траектория движения

Для цитирования: Якубович М. И., Кузнецова О. Б., Пеньковская К. В., Позняков С. И. Алгоритм стабилизации рыскания буксируемого судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 3. С. 38–42. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-3-38-42>. EDN CVXKUE.

Original article

Algorithm for yaw stabilization of a towed vessel

Mikhail I. Yakubovich, Olga B. Kuznetsova, Kseniya V. Penkovskaya[✉], Sergey I. Poznyakov

*Murmansk Arctic University,
Murmansk, Russia, kseniamgtu@rambler.ru[✉]*

Abstract. Towing is one of the most difficult and risky tasks of navigation, since in this case two or more vessels are involved simultaneously. A minimal number of towing-related accidents have been recorded, but they still occur, and the issue remains of improving the safety of such operations. Many years of research and practical experience in conducting towing operations confirm the direct dependence of the safety of their conduct on the trajectory of the towed vessel. The results of the analysis indicate that the disadvantage of existing methods of towing vessels is the yawing of the towed vessel, which leads to an unnecessarily large loss of speed even in light seas, which is mainly caused by the presence of external disturbances. It is proved that in order to increase the safety of towing operations, it is necessary to stabilize the yaw of the towed vessel. An algorithm has been developed to stabilize the ship's course, which allows it to solve the problem of towing along a given trajectory. The algorithm is based on the model of angular motion

of the vessel, which operates with the angular velocity of the towed vessel and the angle of rudder adjustment. Such a model of the angular motion of a towed vessel is used, in which this speed can be controlled by the effects of the angle of the rudder. At the same time, the stabilization algorithm “converges” to a stable course even in the presence of significant external disturbances. The resulting mathematical model is solved using the least squares method and is capable of both stabilizing and minimizing the yaw of the towed vessel. The proposed empirical method for assessing the stability of the course of a towed vessel can provide additional navigational safety for towing operations.

Keywords: stabilization algorithm, safety of towing operations, towing of the vessel, yawing of the towed vessel, the trajectory of movement

For citation: Yakubovich M. I., Kuznetsova O. B., Penkovskaya K. V., Poznyakov S. I. Algorithm for yaw stabilization of a towed vessel. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;3:38-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-3-38-42>. EDN CVXKUE.

Введение

Обзор аварийности судов на море свидетельствует о низком уровне аварийности при потере и/или повреждении буксируемого объекта, однако аварии, допущенные в результате потери управляемости в ходе буксировки, все еще случаются и, следовательно, необходима проработка вопросов повышения безопасности при проведении буксирных операций по заданной траектории.

Теоретические исследования [1–5] подтверждают, что все буксируемые суда обладают рыскливостью, которую с точки зрения безопасности нужно нивелировать до допустимых пределов, т. е. стабилизировать их движение. Особенно остро эта проблема возникает при наличии серьезных внешних возмущений, обусловленных действием ветра и волны.

Рыскание буксируемого судна приводит к достаточно большой потере в скорости, поэтому целесообразно разработать алгоритм, позволяющий стабилизировать движение буксируемого судна, особенно при развитом волнении на море, и иметь производную от величины рыскания, в которой была бы минимально возможная составляющая от возмущения, вызывающая это рыскание. При составлении алгоритма стабилизации движения буксируемого судна и минимизации процесса его рыскания будем использовать такую модель углового движения буксируемого судна, в которой этой скоростью можно управлять воздействиями от угла перекладки руля.

Постановка задачи

Восстановление модели рыскания буксируемого судна можно осуществить с помощью полной модели углового движения судна, но такая модель сложна в реализации. Поэтому, основываясь на известном упрощении дифференциального уравнения углового движения буксируемого судна, используем для реализации стабилизации и уменьшения по модулю величины рыскания судна на буксире упрощенную модель вида:

$$d\omega / dt = \omega / T - k_{\delta} \delta / T, \quad (1)$$

причем далее будем рассматривать модель движения устойчивого судна.

Уравнение (1) имеет два настраиваемых параметра: постоянную времени $1 / T$ и коэффициент эффективности руля k_{δ} . Ввиду сложной зависимости параметров T и k_{δ} от конкретных эксплуатационных условий буксировки желательно автоматически подстраивать эти параметры на основании информации об угловой скорости буксируемого судна ω и угла перекладки руля $\delta(t)$. Таким образом, задача состоит в том, чтобы при заданной структуре математической модели углового движения буксируемого судна и на основании измерений $\omega(t)$ и $\delta(t)$ осуществлять идентификацию параметров модели T и k_{δ} , которые способны как стабилизировать, так и минимизировать рыскание буксируемого судна.

Если параметры $1 / T$ и k_{δ} / T точно не известны, что равносильно изменению режима эксплуатации буксируемого судна, то при подстановке значений данных от реального буксируемого объекта $d\omega(t) / dt$, $d\omega(t)$ и $\delta(t)$ в выражение (1) равенство не будет соблюдаться. Поэтому обозначим невязку уравнения (1) через $\varepsilon(t)$, а параметры модели $a_1 = 1 / T$ и $a_2 = k_{\delta} / T$, тогда

$$\varepsilon(t) = d\omega / dt + a_1 \omega + a_2 \delta.$$

Качество идентификации параметров a_1 и a_2 можно оценивать с помощью метода наименьших квадратов с весовой функцией вида:

$$(a_1, a_2) = \int_0^T f(t) \varepsilon^2(t) dt.$$

Весовую функцию $f(t)$ можно выбрать, например, из условия так, чтобы квадрат невязки $\varepsilon^2(t)$ учитывался с тем большим весом, чем позже она была получена. Функцией $f(t)$, удовлетворяющей этому условию, является экспонента

$$F(t) = e^{-\alpha(T-t)}.$$

Коэффициент затухания экспоненты α характеризует интервал осреднения квадрата невязки $\varepsilon^2(t)$

и может быть подобран экспериментально. В дальнейшем будем предполагать, что процесс рыскания буксируемого судна наблюдается достаточно долго, чтобы принять нижний предел в критерии равным $-\infty$. Таким образом, чтобы стабилизировать и минимизировать рыскание буксируемого судна, критерий задается так:

$$J(a_1, a_2) = \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} (d\omega / dt + a_1\omega + a_2\delta)^2 dt.$$

$$\begin{cases} \partial J(a_1, a_2, T) / \partial a_1 = 2 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} (d\omega / dt + a_1\omega + a_2\delta)^2 dt = 0, \\ \partial J(a_1, a_2, T) / \partial a_2 = 2 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} (d\omega / dt + a_1\omega + a_2\delta)^2 dt = 0. \end{cases}$$

Примем, что объект стационарен на интервале осреднения, задаваемом экспоненциальной весо-

Стабилизация процесса рыскания буксируемого судна

Необходимым условием минимума критерия будет выполнение системы уравнений относительно параметров a_1 и a_2 :

$$\begin{cases} \partial J(a_1, a_2, T) / \partial a_1 = 0, \\ \partial J(a_1, a_2, T) / \partial a_2 = 0. \end{cases}$$

Запишем эти условия:

вой функцией, поэтому коэффициенты a_1 и a_2 можно выносить за знак интеграла:

$$\begin{cases} a_1 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \omega^2 dt + a_2 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \omega \delta dt = - \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \omega' \omega dt, \\ a_1 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \omega \delta dt + a_2 \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \delta^2 dt = - \int_{-\infty}^T e^{-\alpha(T-t)} \omega' \delta dt. \end{cases} \quad (2)$$

Полученную систему линейных уравнений можно разрешить относительно a_1 и a_2 или в векторной форме:

$$a^* = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \text{ и } y^* = \begin{bmatrix} \omega \\ \delta \end{bmatrix}.$$

Перепишем систему уравнений (2):

$$\left[\int_{-\infty}^T (e^{-\alpha(T-t)}) y^* y^{**} dt \right] a^* = - \int_{-\infty}^T (e^{-\alpha(T-t)}) \omega' y^* dt. \quad (3)$$

Для получения решений вектора a^* в рекуррентной форме продифференцируем равенство (3) по T :

$$da^* / dt = - \left[\int_{-\infty}^T (e^{-\alpha(T-t)}) y^* y^{**} dt \right]^{-1} y^* \varepsilon(T).$$

Обозначив обратную матрицу

$$\gamma(T) = - \left[\int_{-\infty}^T (e^{-\alpha(T-t)}) y^* y^{**} dt \right]^{-1}$$

$$\begin{cases} d : a_1 / dT = (-\alpha\omega / (\omega^2 + \delta^2)) / (d\omega / dt + a_1\omega + a_2\delta), \\ d : a_2 / dT = (-\alpha\delta / (\omega^2 + \delta^2)) / (d\omega / dt + a_1\omega + a_2\delta). \end{cases} \quad (5)$$

Использование для упрощения полученного алгоритма принужденного решения уравнений (4) способно повлиять на его сходимость, поэтому далее целесообразно исследовать сходимость алгоритма (4). Пусть a_{10} и a_{20} – истинные значения ис-

и взяв производную от $\gamma(T)$, получим систему уравнений для рекуррентного расчета параметров:

$$\begin{cases} da^* / dT = - \gamma(T) y^* (T) \varepsilon(T), \\ d\gamma / dt = \alpha\gamma(T) - \gamma(T) y^* y^{**} \gamma(T). \end{cases} \quad (4)$$

Если взять в качестве матрицы $\gamma(T)$ принужденное решение, при котором правая часть уравнения (4) обращается в нуль, то можно несколько упростить полученный алгоритм [1]. В данном случае таким принужденным решением будет выражение вида:

$$\gamma_{пр}(T) = \alpha y^* (y^{**} y^*)^{-2} y^{**}.$$

Подставим это принужденное решение в уравнение для производной da^* / dT и получим:

$$da^* / dT = -\alpha \varepsilon(T) y^* / y^{**} y^*.$$

В скалярной форме оно может быть записано так:

$$d\omega / dt = -a_{10}\omega - a_{20}\delta.$$

комых параметров, другими словами – соблюдается равенство (1):

Тогда можно записать невязку уравнений в виде:

$$\varepsilon(t) = \Delta a_1 \omega + \Delta a_2 \delta.$$

Перепишем уравнения поиска (5) с учетом составленной невязки $\varepsilon(t)$ и стационарности движения буксируемого судна ($a_{10} = \text{const}$ и $a_{20} = \text{const}$):

$$\begin{cases} d\Delta: a_1 / dt = -(\alpha \omega / (\omega^2 + \delta^2)) / (\Delta: a_1 \omega + \Delta: a_2 \delta), \\ d\Delta: a_2 / dt = -(\alpha \delta / (\omega^2 + \delta^2)) / (\Delta: a_1 \omega + \Delta: a_2 \delta). \end{cases} \quad (6)$$

Алгоритм (6) сходится в смысле монотонного уменьшения суммы квадратов ошибок величины

$$[(\Delta: a_1)^2 + (\Delta: a_2)^2].$$

Действительно, производная от этой величины с учетом выражения (6):

$$d / dt [(\Delta: a_1)^2 + (\Delta: a_2)^2] = 2\alpha (\Delta: a_1 \omega + \Delta: a_2 \delta)^2 / (\omega^2 + \delta^2) < 0.$$

Так как производная является отрицательной величиной, это означает, что рыскание не может увеличиваться, следовательно, можно признать – алгоритм будет сходиться и обеспечивать стационарность движения буксируемого судна.

Обсуждение полученных результатов

Долгое время научные исследования в части повышения безопасности проведения буксирных операций проводились в направлении повышения эффективности управления буксирующим судном [4]. Однако безопасность выполнения буксирных операций в целом во многом зависит от траектории движения буксируемого судна, особенно если имеются дополнительные внешние возмущения. Это требует проведения дополнительных эмпирических исследований, определения способов и методов управления системой «буксир – буксируемое судно» для решения задачи обеспечения устойчивости движения буксируемого судна, т. е. минимизации

его рыскания [6–8].

В работе представлен алгоритм, позволяющий стабилизировать движение буксируемого судна при отягчающих внешних факторах. В основу алгоритма положена модель углового движения судна, включающая угловую скорость буксируемого судна и угол перекладки руля. Доказано сходжение предложенного алгоритма, который обеспечивает стационарность движения буксируемого судна.

Заключение

Доказанная возможность стабилизации рыскания буксируемого судна и составленный алгоритм такой стабилизации позволяют решить задачу буксировки по заданной траектории.

Алгоритм стабилизации «сходится» даже при наличии внешних существенных возмущений и позволяет обезопасить проведение буксирных операций по системе «буксир – буксируемое судно».

Список источников

1. Бражный А. И. Навигационная безопасность каравана при морских и океанских буксировках плавучих сооружений: дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, 2018. 168 с.
2. Гуров П. В. Управляемость буксирного состава в сложных путевых и метеорологических условиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2013. 20 с.
3. Юдин Ю. И., Ищейкин Г. Ю. Моделирование изменений длины и натяжения троса в процессе выполнения буксирной операции // Мор. интеллектуал. технологии. 2020. № 4-4 (50). С. 8–12.
4. Юдин Ю. И., Ищейкин Г. Ю. Управление движением буксируемого судна путем изменения натяжения и длины буксирного троса // Эксплуатация мор. трансп. 2022. № 4 (105). С. 10–19.

5. Каян В. В. Разработка безопасных способов маневрирования судна при выполнении буксирных операций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, 2014. 22 с.
6. Пат. 2470828 Рос. Федерация, МПК В 63 Н 25/04 (2006.01). Способ управления траекторией движения буксируемого судна / Юдин Ю. И., Каян В. В. № 2011115725/11; заявл. 20.04.2011; опубл. 27.12.2012.
7. Пат. 2615846 Рос. 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. № 2015143563/15; заявл. 12.10.2015; опубл. 11.04.2017.
8. Юдин Ю. И., Пашенцев С. В. Оценка безопасности буксирной операции методами математического моделирования. М.: Моркнига, 2015. 142 с.

References

1. Brazhnyi A. I. *Navigatsionnaia bezopasnost' karavana pri morskikh i okeanskikh buksirovkakh plavuchikh sooruzhenii: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Navigation safety of a caravan during sea and ocean towing of floating struc-

- sooruzhenii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Navigation safety of a caravan during sea and ocean towing of floating struc-

tures: dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Murmansk, 2018. 168 p.

2. Gurov P. V. *Upravliaemost' buksirnogo sostava v slozhnykh putevykh i meteorologicheskikh usloviakh: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* [Controllability of the tow train in difficult track and meteorological conditions: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Nizhnii Novgorod, 2013. 20 p.

3. Iudin Iu. I., Ishcheikin G. Iu. Modelirovanie izmenenii dliny i natiasheniia trosa v protsesse vypolneniia buksirnoi operatsii [Modeling of cable length and tension changes during the towing operation]. *Morskoe intelektual'nye tekhnologii*, 2020, no. 4-4 (50), pp. 8-12.

4. Iudin Iu. I., Ishcheikin G. Iu. Upravlenie dvizheniem buksiruемого судна путем изменения натяжения и длины буксирного троса [Controlling the movement of the towed vessel by changing the tension and length of the tow rope]. *Ekspluatatsiia morskogo transporta*, 2022, no. 4 (105), pp. 10-19.

5. Kaian V. V. *Razrabotka bezopasnykh sposobov manevrirovaniia sudna pri vypolnenii buksirnykh operatsii: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of safe ways of maneuvering a vessel when performing towing operations: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Murmansk, 2014. 22 p.

6. Iudin Iu. I., Kaian V. V. *Sposob upravleniia traektoriei dvizheniia buksiruемого судна* [A method for controlling the trajectory of a towed vessel]. Patent RF, no. 2011115725/11, 27.12.2012.

7. Iudin Iu. I., Vlasov A. V., Kaichenov A. V., Viskov A. Iu. *Sposob upravleniia dvizheniem buksirnoi sistemy* [The method of motion control of the towing system]. Patent RF, no. 2015143563/15, 11.04.2017.

8. Iudin Iu. I., Pashentsev S. V. *Otsenka bezopasnosti buksirnoi operatsii metodami matematicheskogo modelirovaniia* [Assessment of the safety of the towing operation by mathematical modeling methods]. Moscow, Morkniga Publ., 2015. 142 p.

Статья поступила в редакцию 25.05.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2025; принята к публикации 11.08.2025
 The article was submitted 25.05.2025; approved after reviewing 19.06.2025; accepted for publication 11.08.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Иосифович Якубович — аспирант кафедры судовождения; Мурманский арктический университет; yakubovichmi@mauniver.ru

Ольга Борисовна Кузнецова — кандидат экономических наук, доцент; доцент кафедры судовождения; Мурманский арктический университет; kuznetsovaob@mauniver.ru

Ксения Вячеславовна Пеньковская — кандидат технических наук; доцент кафедры судовождения; Мурманский арктический университет; kseniamgtu@rambler.ru

Сергей Иванович Позняков — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры судовождения; Мурманский арктический университет; poznyakovsi@mauniver.ru

Mikhail I. Yakubovich — Postgraduate Student of the Department of Navigation; Murmansk Arctic University; yakubovichmi@mauniver.ru

Olga B. Kuznetsova — Candidate of Economic Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Navigation; Murmansk Arctic University; kuznetsovaob@mauniver.ru

Kseniya V. Penkovskaya — Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Navigation; Murmansk Arctic University; kseniamgtu@rambler.ru

Sergey I. Poznyakov — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Navigation; Murmansk Arctic University; poznyakovsi@mauniver.ru

