

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,
СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА**

**OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION AND
SAFETY OF NAVIGATION**

УДК 629.5.051.5

DOI: 10.37890/jwt.vi74.356

**О выборе математической модели для построения траектории
движения судна в системе поддержки принятия решений
судоводителем**

Р.Э. Галеев

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,
Россия*

Аннотация. В статье показано, что моделирование движения судов позволяет строить прогнозные траектории движения как собственного судна, так и других судов в акватории. Рассмотрены вопросы моделирования и программного построения предполагаемой динамической траектории движения судна как части судовой системы поддержки принятия решений в судовождении (СППР). Проведен анализ математических моделей движения судна, положительно зарекомендовавших себя в исследовательской и проектной практике. Выполнена оценка адекватности математической модели с учетом определения границ её применимости, т.е. выявление типовых режимов движения и проекта (типа) судна, для которых можно пользоваться выбранной моделью. Проведен анализ теоретических расчетов и осциллограмм натурных испытаний серийных судов, показывающий, что динамика речных водоизмещающих судов характеризуется рядом специфических особенностей. Предложена методика выбора математической модели движения судна в целях создания СППР при управлении движением на ближних дистанциях в стесненных навигационных условиях.

Ключевые слова: система прогнозирования движения судна, система поддержки принятия решений в судовождении, математическое моделирование движения судна, траектория.

**On the choice of a mathematical model for constructing the
trajectory of the vessel in the decision support system by the
boatmaster**

Rustem E. Galeev

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article shows that modeling the movement of ships allows you to build predictive trajectories of movement of both your own vessel and other vessels in the water area. The issues of modeling and software construction of the proposed dynamic trajectory of the vessel as part of the ship's decision support system in navigation (DSS) are considered. The analysis of mathematical models of vessel movement that have proven themselves positively in research and design practice is carried out. The adequacy of the mathematical model was assessed taking into account the definition of the limits of its applicability, i.e. identification of typical modes of movement and the design (type) of the vessel for which the

selected model can be used. The analysis of theoretical calculations and oscillograms of full-scale tests of serial vessels is carried out, showing that the dynamics of river displacement vessels is characterized by a number of specific features. The method of choosing a mathematical model of ship movement in order to create a DSS when controlling movement at short distances in cramped navigation conditions is proposed.

Keywords: ship movement forecasting system, decision support system in navigation, mathematical modeling of ship movement, trajectory.

Введение

Основной задачей «систем поддержки принятия решений» [1] в судовождении является повышение безопасности судоходства, учитывающей особенности акваторий, навигационные и гидрометеорологические условия, а также техническую оснащенность судов и подготовку судоводителей. СППР должна минимизировать возможность ошибочных действий судоводителей, в особенности, при управлении по курсу речным водоизмещающим судном, как наиболее сложному варианту движения в условиях ограниченной ширины судового хода и высокой плотности навигационных опасностей.

Актуальность исследований

Очередной этап развития разноплановых цифровых телематических решений в судостроении и судовождении связан с созданием цифровых платформ мониторинга и поддержки управления судовыми технологическими процессами [2]–[6] в целях повышения их эффективности.

На государственном уровне созданию и повсеместному внедрению цифровых технологий и основанных на них систем управления уделяется существенное внимание, о чем свидетельствует Программа «Цифровая экономика РФ», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 г. №1632-р и План мероприятий по направлению «Маринет», (утвержден распоряжением Правительства РФ от 29.03.2018 г. №534-р).

В сфере водного транспорта одной из основных тем в контексте указанных государственных программ является создание новых продвинутых технологий для систем поддержки принятия решений при управлении движением судна, позволяющих минимизировать и даже насколько это окажется возможным снизить влияние человеческого фактора, обеспечивая наилучшим образом в конкретных условиях безопасность судоходства и снижение эксплуатационных расходов.

Актуальность данной темы наглядно проявляется при управлении движением судна на ближних дистанциях в стесненных навигационных условиях – судоходных проливах и узкостях, районах с установленными путями, фарватерами, регулируемым движением и интенсивным судоходством, на мелководье (а также в специфических нештатных ситуациях).

В перечисленных ограничивающих условиях плавания водных районах и акваториях судоводитель в целях обеспечения безопасного движения судна должен уметь в предельно короткие временные промежутки принимать решения, направленные на совместное удовлетворение множества требований, обусловливаемых текущей эксплуатационной обстановкой.

Ошибочное прогнозирование судоводителем траектории движения судна в стесненных навигационных условиях с последующим принятием не вполне корректного решения по управлению движением судна может привести к нештатным ситуациям, по большей части классифицируемым на документальном уровне как навигационные происшествия и аварийные случаи.

Методы и материалы

За последние десятилетия в организации безопасности на водном транспорте произошли существенные изменения с технической стороны, особенно в коммуникационных и интеллектуальных аспектах. Появились технические возможности моделирования судна, отображения окружающей среды ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), обмена информацией (АИС) между цифровыми системами служб движения судов и бортовыми компьютерами судов. С помощью этих средств, возможно, оперативно просчитать результаты решений по различным событийным вариантам, исходным данным и критериям. Опытная эксплуатация указанных технических средств и систем позволяет формулировать направления совершенствования и развития механизмов обеспечения безопасности судоходства.

Моделирование движения судов позволяет строить прогнозные траектории движения, как собственного судна, так и других судов в акватории. Проблематике разработки математических моделей движения судов различных типов посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ, в частности [7]–[9].

Моделирование и программное построение предполагаемой динамической траектории движения судна (ПДТДС), как части судовой системы поддержки принятия решений в судоходстве, возможно на основе данных о маневренных и инерционных характеристиках судна, информации, получаемой в непрерывном режиме от датчиков положения органов управления движительно-рулевым комплексом, показаний линейной и угловой скоростей судна, но все это становится возможным при наличии адекватной математической модели судна, которая должна учитывать его статические и динамические характеристики.

Для целей построения прогнозной траектории движения судна в зависимости от начальных условий и актуального состояния внешней среды необходим алгоритм ситуационного выбора адекватной математической модели из представленных ниже (1.2)–(1.6), как наиболее положительно зарекомендовавших себя в исследовательской и проектной практике.

$$\tau_1 \dot{\omega}(\tau) + \omega(\tau) = k\alpha(\tau) \tag{1.2}$$

$$\tau_1 \dot{\omega}(\tau) + \omega(\tau) = k\alpha(\tau) + |\omega_0| \operatorname{sign} \alpha \tag{1.3}$$

$$\tau_1 \dot{\omega}(\tau) + h\omega(\tau)|\omega(\tau)| + \omega(\tau) = k\alpha(\tau) \tag{1.4}$$

$$\begin{cases} \dot{\beta}(\tau) = -q_{21}\beta(\tau) - r_{21}\omega(\tau) - s_{21}\alpha(\tau), \\ \dot{\omega}(\tau) = -q_{31}\beta(\tau) - r_{31}\omega(\tau) - s_{31}\alpha(\tau), \end{cases} \tag{1.5}$$

$$\begin{cases} \dot{\beta}(\tau) = -q_{21}\beta(\tau) - r_{21}\omega(\tau) - s_{21}\alpha(\tau) - h_1\beta(\tau)|\beta(\tau)|, \\ \dot{\omega}(\tau) = -q_{31}\beta(\tau) - r_{31}\omega(\tau) - s_{31}\alpha(\tau), \\ \dot{\varphi}(\tau) = \omega(\tau) \end{cases} \tag{1.6}$$

где приняты следующие обозначения:

- τ – значение постоянной времени,
- k – коэффициент, характеризующий значение установившейся скорости циркуляции в зависимости от угла перекладки руля,
- ω_0 – скорость самопроизвольной циркуляции,
- h – коэффициент, учитывающий нелинейные особенности судна,
- β – угол дрейфа судна,
- ω – угловая скорость судна,

φ – угол отклонения судна от заданного направления,
 α – угол перекладки пера руля,
 $q_{21}, r_{21}, s_{21}, q_{31}, r_{31}, s_{31}, h_1$ – коэффициенты, характеризующие гидродинамику судна и его движительно-рулевого комплекса (ДРК).

Под адекватностью математической модели будем понимать полноту описания особенностей поведения управляемого судна на ближних дистанциях в реальных условиях плавания [9]. Именно такой подход как критерий оценки адекватности при отборе моделей для СППР принят в настоящей работе.

Каждая из моделей (1.2)-(1.6) адекватно описывает конкретный, «свой» набор режимов движения судна.

Решение задачи оценки адекватности выбранной математической модели заключается в определении границ её применимости, т.е. выявление типовых режимов движения и проекта (типа) судна, для которых можно уверенно пользоваться выбранной моделью.

Теоретические расчеты и осциллограммы натурных испытаний [10] массовых проектов 26-37, 588, 302, 19620, 1565, Н-3291, покрывающие 99% парка судов, эксплуатируемых на ВВП, показали, что динамика речных водоизмещающих судов характеризуется рядом специфических особенностей приведенных на рисунке 1:

- «S»-образная статическая характеристик управляемости судна;
- правосторонняя с угловой скоростью $+\omega_0$ или левосторонняя с угловой скоростью $-\omega_0$ самопроизвольная циркуляции, если отсутствует управляющее воздействие, т.е. угол поворота пера руля $\alpha = 0$ [11];
- при некоторых сочетаниях фазовых координат текущего состояния, воздействий внешней среды и управления судно может оказаться в области пониженной управляемости (область А) [12]-[13]. При изменении состояния внешней среды меняется также и топология этой области, также существенное влияние на расположение и размер области А оказывают участки акватории с малыми глубинами (0,5 - 1,0 м под килем);
- при управляющем воздействии α менее некоторой предельной критической величины $\alpha_{кр}$, т.е. для $|\alpha| \leq \alpha_{кр}$ возможна непрогнозируемая изменение траектории движения судна (количество измеряемых координат состояния (φ, ω, V) меньше, чем общее количество координат в полной модели $(\varphi, \omega, \beta, V)$);
- возможна реализация продолжительного колебательного процесса (область В).

Именно с позиций наличия в совокупности этих четырёх специфических особенностей динамики речных водоизмещающих судов, т.е. по значимым (хотя и косвенным признакам) предлагается оцениваться степень адекватности математической модели судна для СППР при управлении движением водоизмещающего судна в стесненных навигационных условиях.

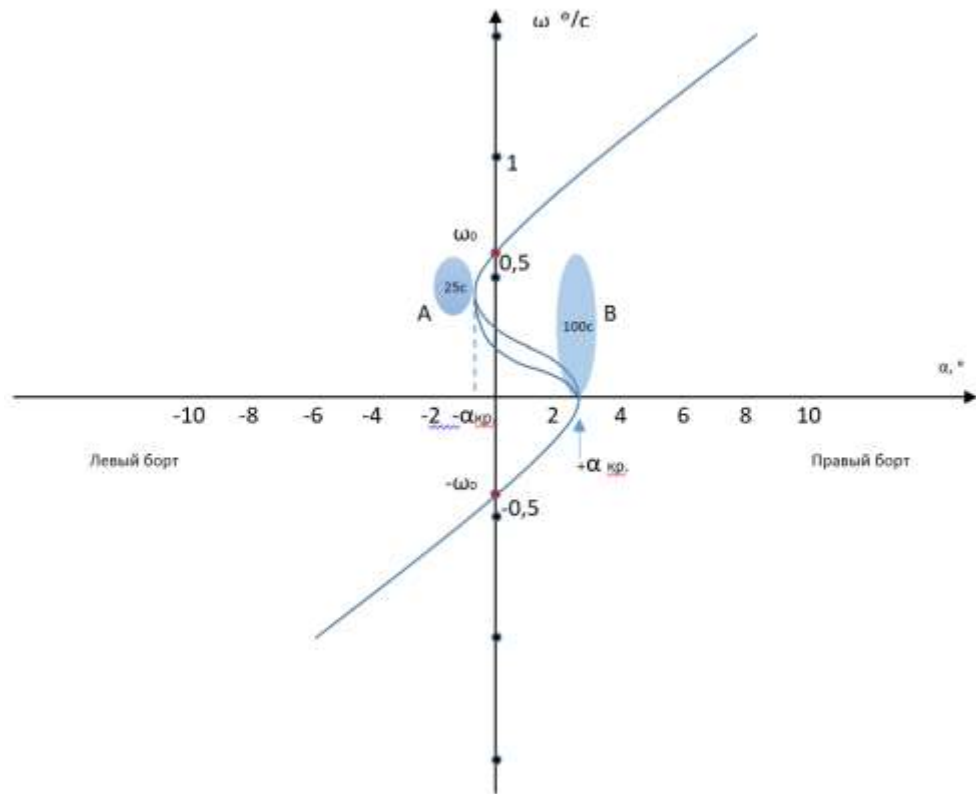


Рис. 1. Статическая характеристика управляемости судов проектов 26-37 и 588

Результаты

Анализ статических характеристик управляемости, которые построены по рассматриваемым моделям (рисунки 2- 4), показывает, что только модели (1.3), (1.4) и (1.6) отражают первую особенность речного водоизмещающего судна – выходить на самопроизвольную циркуляцию при отсутствии управляющего воздействия. Модель Першица (1.6) наиболее точно воспроизводит характеристику управляемости неустойчивых на курсе судов.

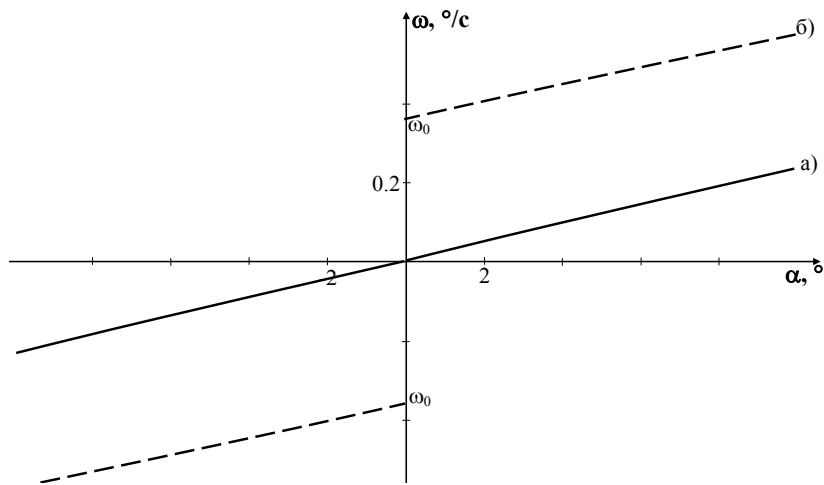


Рис. 2. Статическая характеристика управляемости судна для моделей: а) (1.2); б) (1.3)

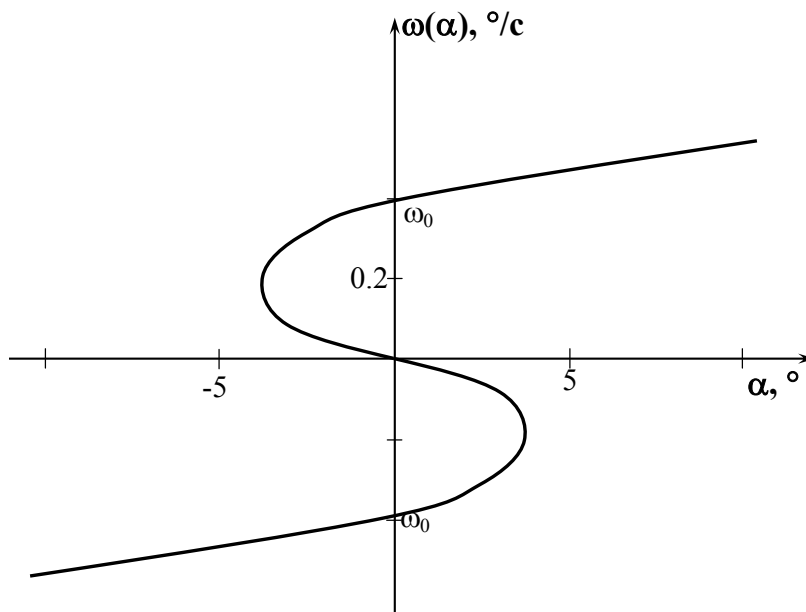


Рис. 3. Статическая характеристика управляемости судна для модели (1.4)
при $\tau = 33, k = 0.023, h = -2.5$

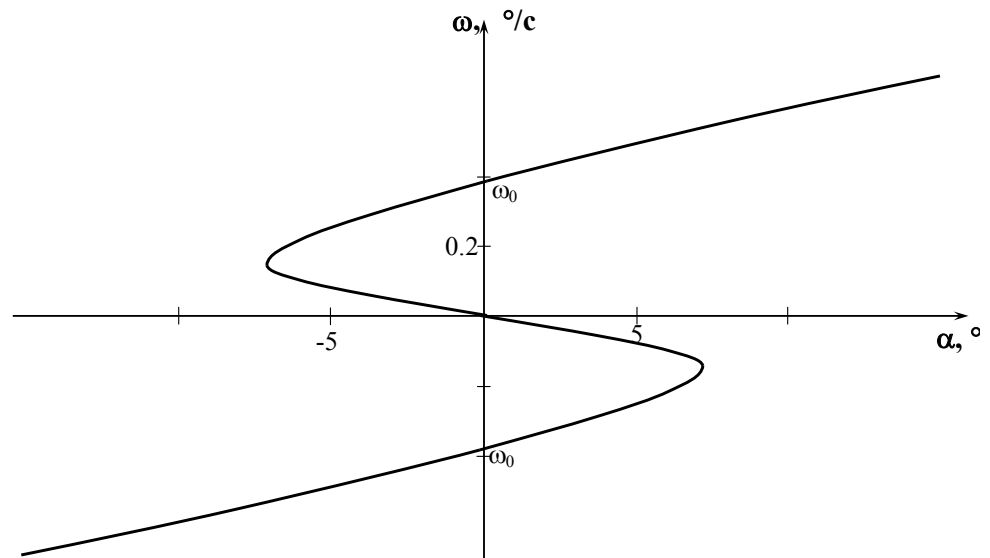


Рис. 4. Статическая характеристика управляемости судна для модели (1.6).
 $q_{21} = -0.066$, $r_{21} = -0.021$, $s_{21} = -0.0007$, $q_{31} = -0.127$, $r_{31} = 0.083$, $s_{31} = -0.0008$, $h_1 = 0.376$

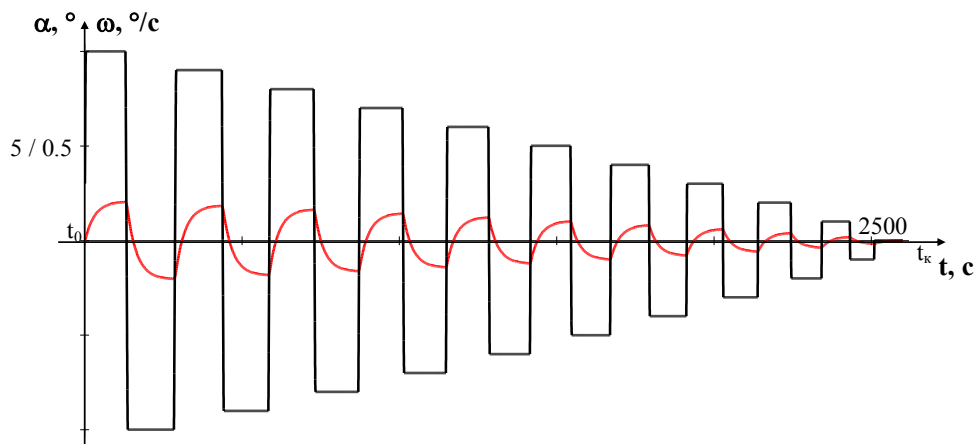
При анализе моделей (1.2)-(1.6) с позиций наличия свойств отражать динамические особенности речного водоизмещающего судна используя полученные характеристики управляемости и статико-динамические портреты (рисунки 5 -7) для рассматриваемых моделей можно сделать следующие выводы.

1) Если судно, теоретически устойчиво на курсе, то использование для целей реализации в СППР практически любой модели допустимо, поскольку такие суда не обладают ни одной из особенностей, присущих неустойчивым на курсе речным водоизмещающим судам.

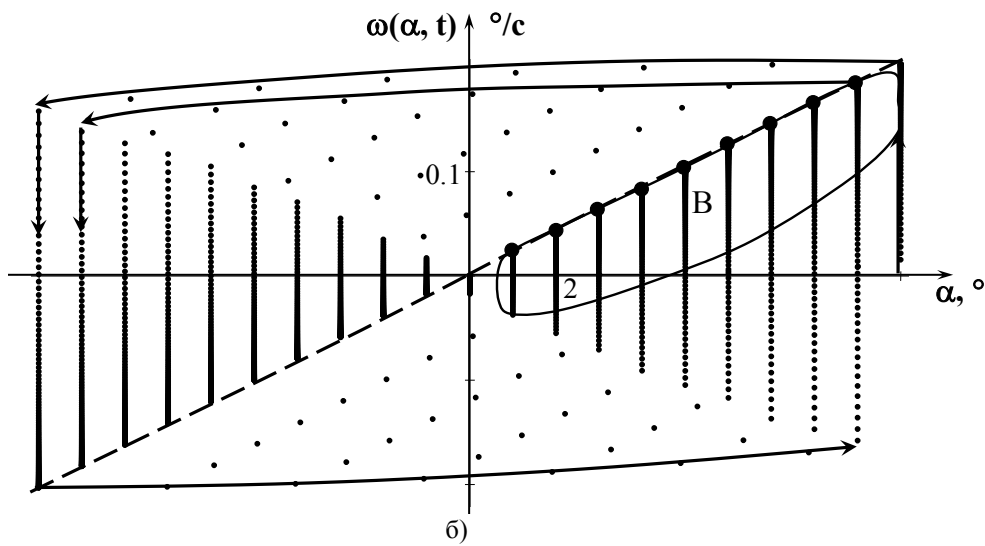
Для неустойчивых судов приемлемой для целей реализации в СППР является модель (1.6), ибо из рассмотренных моделей только она отражает три из четырех особенностей неустойчивых на курсе судов, а именно:

- «S» – образный характер статической характеристики и способность выходить на самопроизвольную циркуляцию при отсутствии управляющего воздействия;
- попадание в области пониженной управляемости;
- возможность непредсказуемой реакции, если управление меньше критической величины.

2) Динамическая особенность «блуждание» координаты состояния $\omega(t)$ (рис. 2.1, область В) не выявляется ни одной из рассмотренных моделей.



а)



б)

Рис. 5. Сканирование плоскости $\omega(\alpha)$ по модели (1.2)

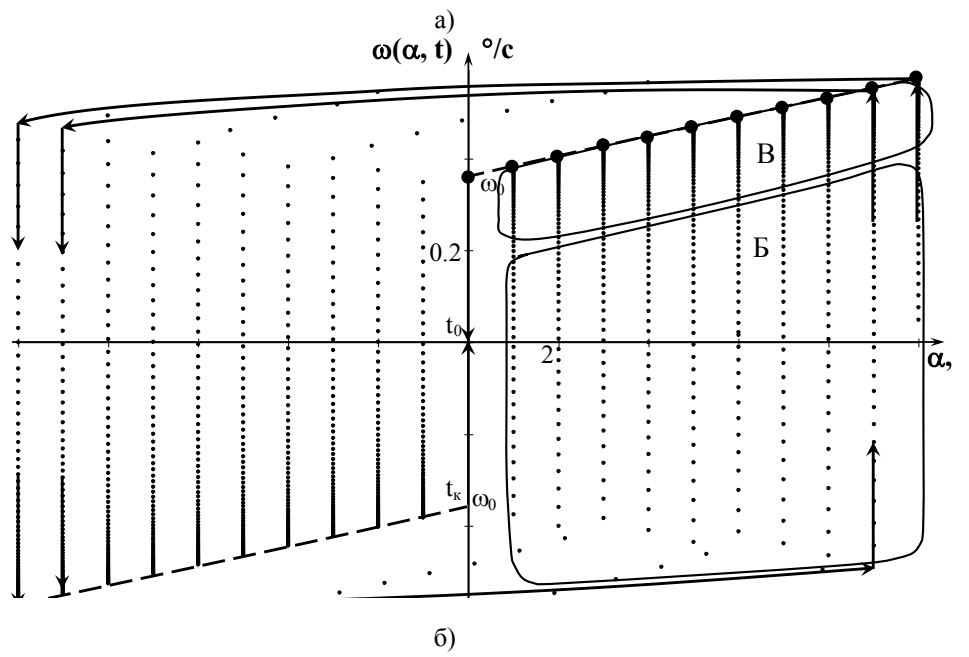
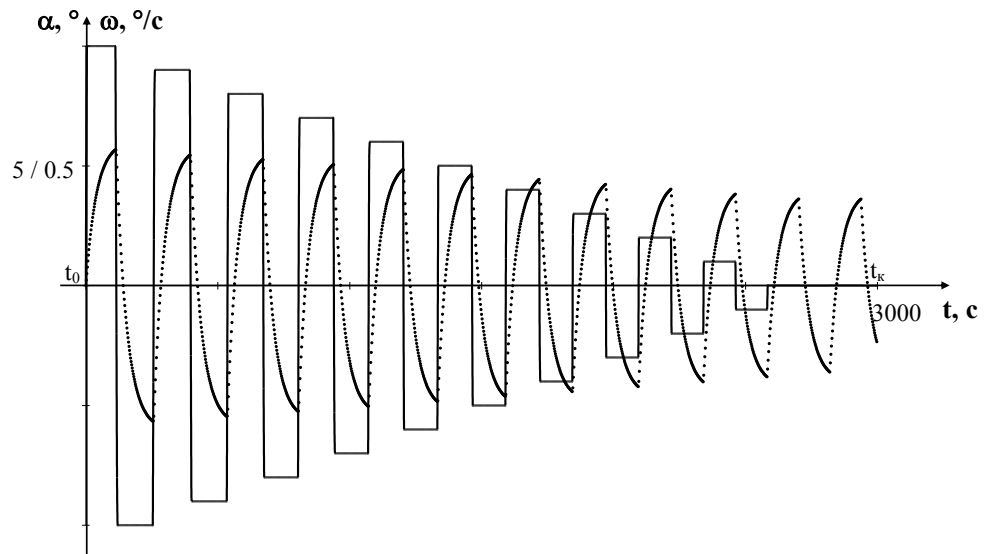


Рис. 6. Сканирование плоскости $\omega(\alpha)$ по модели (1.3)

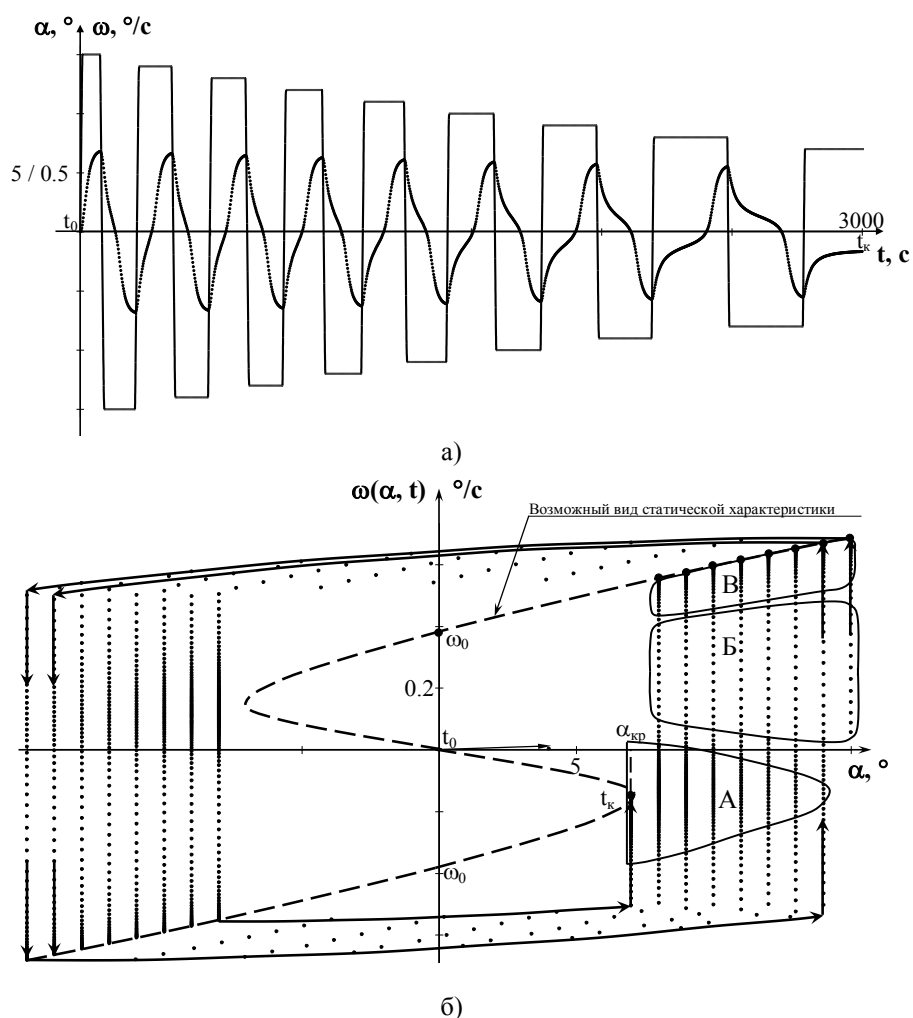


Рис. 7. Сканирование плоскости $\omega(\alpha)$ по модели (1.6)

Таким образом, для дальнейших исследований в условиях неустойчивого на курсе речного водоизмещающего судна наибольшей степенью адекватности отличается модель (1.6), которая отражает три из вышеуказанных особенностей поведения реального судна. По одной особенности отражают модели (1.3) и (1.4), а у моделей (1.2) и (1.5) вышеотмеченные существенные особенности динамики неустойчивого на курсе речного водоизмещающего судна отсутствуют.

С учетом данных динамических особенностей речного водоизмещающего предлагается [14] брать за основу линеаризованную модель, дополненную значениями гидродинамических коэффициентов $q_{21}, r_{21}, s_{21}, q_{31}, r_{31}, s_{31}, h_1$ судна типового проекта, что позволит получить приемлемую качественную и количественную близость модельной и экспериментальной прогнозных траектории движения управляемого по курсу речного водоизмещающего судна на ближних дистанциях.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В целях создания СППР при управлении движением на ближних дистанциях в стесненных навигационных условиях устойчивого на курсе речного водоизмещающего судна и отсутствии внешних факторов влияния можно ограничиться использованием базовых моделей (1.2), (1.3).
2. В условиях неустойчивого на курсе речного водоизмещающего судна для СППР при управлении движением на ближних дистанциях в стесненных навигационных условиях применима модель (1.6).

Список литературы

1. Галеев Р.Э. Программный комплекс моделирования и визуализации траектории движения судна «поворот» в системе поддержки принятия решений / Р.Э. Галеев, Ю.С. Федосенко, А.В. Соловьёв // Транспорт (XXI век), 2021. – № 3(99) – С. 37—38.
2. Дерябин В.В. Обзор исследований, посвященных использованию нейросетевых технологий в судовождении / В.В. Дерябин. – М.: Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник, 2015, № 11, С. 52-60.
3. Каретников В.В. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В.В. Каретников, И.В. Пашенко, А.И. Соколов – СПб.: Вестник ГУМРФ им. Адмирала Макарова 2017, Т9, №3, С. 619 – 627.
4. Балущкин Е.М. Автоматизация современного судна: перспективы / Е.М. Балущкин, С.С. Коротков – СПб.: Морской вестник, 2018, №3(67), С. 115-116.
5. Титов А.В. Системы управления безэкипажными судами / А.В. Титов, Л.Баракат, В.А. Чанчиков, Г.А. Тактаров, О.Л. Ковалев – СПб.: Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-4(43), С. 109-120.
6. Кирилова М.А. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации / М.А. Кириллова, А.И. Рожко – А.: Вестник Астраханского ГТУ, 2020, №3, С. 16-22.
7. Соловьёв А.В. Информационное обеспечение системы управления судном / А.В. Соловьёв, А.В. Чернышов, М.М. Чиркова, // Морские интеллектуальные технологии, 2021. – №1 том 1 – С.71-75.
8. Abdel-latif S. Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model / S. Abdel-latif, M. Abdel-Geliel, E. E. Zakzouk // Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704.
9. Тумашик А.П. Идентификация судна как объекта управления по данным модельных испытаний / А.П. Тумашик // Судостроение. – 1981. - №7. - С.9-13.
10. Чиркова М.М. Методика проведения испытаний для определения скрытых свойств подвижных объектов с одной неизмеряемой координатой состояния / М.М. Чиркова // Межвуз. сб. науч. тр.: Моделирование и оптимизация сложных систем. – Н.Новгород: ВГАВТ. - 1996. - вып. 273. - С.175-184.
11. Чиркова М.М. Разработка методов идентификации и управления движением неустойчивого на курсе объекта со скрытыми динамическими особенностями. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук [текст] / М.М. Чиркова - Н.Новгород.1998. – С.207.
12. Фейгин М.И. Динамика неустойчивого на прямом курсе судна / М.И. Фейгин, М.М. Чиркова // Судостроение. – 1987. - №7. - С.23-25.
13. Чиркова, М.М. Исследование скрытых динамических свойств подвижных объектов с одной неизмеряемой координатой состояния / М.М. Чиркова // Нелинейные колебания механических систем. Тез. докл. IV Межд. конф. 17-19 сентября 1996 г. – Н.Новгород, 1996. – С.161.
14. Мартюк Г.И. Учет мелководья в математической модели судна с целью оценки его влияния на маневренные характеристики / Г.И. Мартюк, Ю.И. Юдин, А.Ю. Юдин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2004. Т. 7. № 3. С.390-397.

References

1. Galeev R.E. Software package for modeling and visualization of the trajectory of the vessel "turn" in the decision support system / R.E. Galeev, Yu.S. Fedosenko, A.V. Soloviev // *Transport (XXI century)*, 2021. – № 3(99) – Pp. 37-38.
2. Deryabin V.V. Review of research on the use of neural network technologies in navigation / V.V. Deryabin. – M.: *Transport: science, technology, management. Scientific Information Collection*, 2015, No. 11, pp. 52-60.
3. Karetnikov V.V. Prospects for the introduction of unmanned navigation on the inland waterways of the Russian Federation / V.V. Karetnikov, I.V. Pashchenko, A.I. Sokolov – St. Petersburg: *Bulletin of the GUMRF. Admiral Makarov 2017*, T9, No.3, pp. 619 – 627.
4. Balushkin E.M. Automation of a modern vessel: prospects / E.M. Balushkin, S.S. Korotkov – St. Petersburg: *Marine Bulletin*, 2018, No. 3(67), pp. 115-116.
5. Titov A.V. Control systems for unmanned vessels/ A.V. Titov, L.Barakat, V.A. Chanchikov, G.A. Taktarov, O.L. Kovalev – St. Petersburg: *Marine Intelligent Technologies*, 2019, No. 1-4(43), pp. 109-120.
6. Kirilova M.A. Prospects for the development of unmanned vessels in the Russian Federation / M.A. Kirillova, A.I. Rozhko – A.: *Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2020, No. 3, pp. 16-22.
7. Solovev A.V. Data support of ship's control system / A.V. Solovev, A.V. Chernyshov, M.M. Chirkova // *Marine intellectual technologies*, 2021. – №1 T. 1 — Pp. 71–75.
8. Abdel-latif S. Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model / S. Abdel-latif, M. Abdel-Geliel, E.E. Zakzouk // *Control & Automation (MED)*, 2013 21st Mediterranean Conference on. — IEEE, 2013. - Pp. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704.
9. Tumashik A.P. Identification of a vessel as a control object according to the data of model tests / A.P. Tumashik // *Shipbuilding*. – 1981. - No.7. - Pp.9-13.
10. Chirkova M.M. Test procedure for determining the hidden properties of moving objects with one immeasurable state coordinate / M.M. Chirkova // *Mezhvuz. sb. scientific tr.: Modeling and optimization of complex systems*. – N.Novgorod: VGAVT. - 1996. - issue 273. - Pp.175-184.
11. Chirkova M.M. Development of methods for identifying and controlling the movement of an unstable object on the course with hidden dynamic features. dis. for the degree of Doctor of Technical Sciences [text] / M.M. Chirkova - N.Novgorod.1998. – P.207.
12. Feigin M.I. Dynamics of an unstable vessel on a straight course / M.I. Feigin, M.M. Chirkova // *Shipbuilding*. – 1987. - No.7. - pp.23-25.
13. Chirkova, M.M. Investigation of hidden dynamic properties of moving objects with one immeasurable state coordinate / M.M. Chirkova // *Nonlinear oscillations of mechanical systems. Tez. dokl. IV Inter. conf. 17-19 September 1996* – N.Novgorod, 1996. – P.161.
14. Martyuk G.I. Accounting for shallow water in a mathematical model of a vessel in order to assess its effect on maneuverability characteristics / G.I. Martyuk, Yu.I. Yudin, A.Yu. Yudin // *Bulletin of the Moscow State Technical University. Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2004. Vol. 7. No. 3. Pp.390-397.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Галеев Рустем Эдуардович, аспирант,
Волжский государственный университет
водного транспорта, 603951, г. Нижний
Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail:
R.Galeev@volgafлот.com

Rustem E. Galeev, postgraduate student,
Volga State University of Water Transport,
603951, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-
mail: R.Galeev@volgafлот.com

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; опубликована онлайн 20.03.2023.
Received 12.01.2023; published online 20.03.2023.