

УДК629.5.061
DOI: 10.37890/jwt.vi74.336

Динамика колесного судна при изменении курса

Л.С. Грошева¹

В.И. Плющаев¹

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Маневрирование колесного судна осуществляется изменением соотношения частот вращения гребных колес, расположенных по бортам в корме судна. В статье на основе математической модели колесного судна рассматриваются динамические характеристики комплекса судно-система управления при изменении курса судна. Предложено при синтезе траектории движения при смене курса включать в нее участки собственных движений комплекса судно-система управления (движения по которым осуществлялись бы без внешних воздействий). Описан алгоритм управления изменением курса судна с использованием собственных движений комплекса судно-система управления. Приведены результаты математического моделирования динамических характеристик комплекса при реализации алгоритма перехода судна на новый курс с использованием предложенного подхода.

Ключевые слова: колесное судно, безэкипажное судовождение, курс, динамические характеристики, система управления, алгоритм управления.

Wheeled vessel dynamics at heading change

Ludmila S. Grosheva¹

Valery I. Plyushchayev¹

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Wheeled vessel maneuvering is carried out by changing the ratio of rotation speeds of propeller wheels located alongside in the stern of the vessel. Based on the wheeled vessel mathematical model the article considers the dynamic characteristics of the vessel-control system complex when changing vessel's heading. It is proposed to include sections of own movements of the vessel-control system complex (movements along which would be carried out without external influences) when synthesizing the movement trajectory at heading change. An algorithm for controlling the change in the vessel's heading using its own movements of the ship control system complex is described. The results of mathematical modeling of the complex dynamic characteristics when implementing the algorithm for the vessel's transition to a new heading using the proposed approach are given.

Keywords: wheeled vessel, unmanned navigation, heading, dynamic characteristics, control system, control algorithm.

Введение

Система управления безэкипажным судном должна выполнять широкий круг задач для обеспечения плавания по заданному маршруту [1-4]. Одна из них – управление движительно-рулевым комплексом судна при изменении курса. Должен быть обеспечен переход с одной прямолинейной траектории на другую с минимальными отклонениями от этих траекторий без существенного изменения скорости движения, при этом судно не должно выходить за пределы судового хода (пунктирные линии на рис. 1).

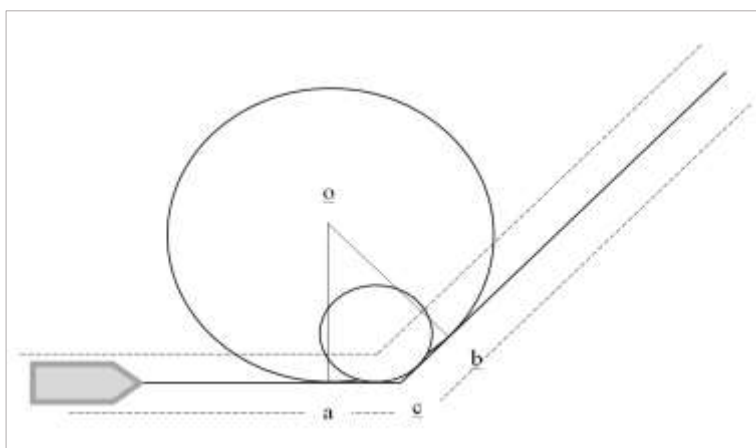


Рис. 1. Изменение курса судна

В данной статье эта задача решается для судна с колесным движительно-рулевым комплексом. Сейчас в России эксплуатируется 3 судна такого типа, спущено на воду крупное пассажирское судно с этим типом движителей [5]. Компьютеризированная система управления (КСУ) судна обеспечивает маневрирование судна с помощью двух независимых частотных электроприводов гребных колес, расположенных по бортам судна в кормовой части [5,6].

Для формирования управляющих воздействий в КСУ используется вспомогательная функция [7,8]

$$R = k_{\alpha}(\alpha - \alpha_0) + k_{\omega}\omega + k_y(y - y_0), \quad (1)$$

где $(\alpha - \alpha_0)$ – отклонение от заданного курса судна, рад;

ω - угловая скорость поворота судна, рад/с;

$(y - y_0)$ - отклонение от заданной траектории, м;

$k_{\alpha}, k_{\omega}, k_y$ - коэффициенты пропорциональности.

Динамика судна при переходе на новый курс с использованием (1) представлена на рис. 2 при изменении курса с 0^0 на 30^0 . На рисунке красными отрезками показано положение ДП судна (кружок – корма судна, крестик – нос судна). Длина отрезка не связана с длиной судна и определяет только положение ДП. Алгоритм удержания судна на курсе, использующий (1) не учитывает в полной мере инерционность судна, поэтому не в состоянии обеспечить выход судна на новый курс. Это связано с тем, что для каждого промежуточного положения судна по координате x при переходе на следующий отрезок траектории неверно определяется отклонение по координате y (уравнение (1) работает в неподвижной системе координат xu , «привязанной» к первому участку траектории). Эта ошибка приводит к неудовлетворительной динамике.

Выход на новый курс можно обеспечить, исключив из (1) третий член. В этом случае система управления может вывести судна на новый курс (рис. 2б), однако при этом наблюдается колебательный переходный процесс и значительное смещение траектории движения от заданной.

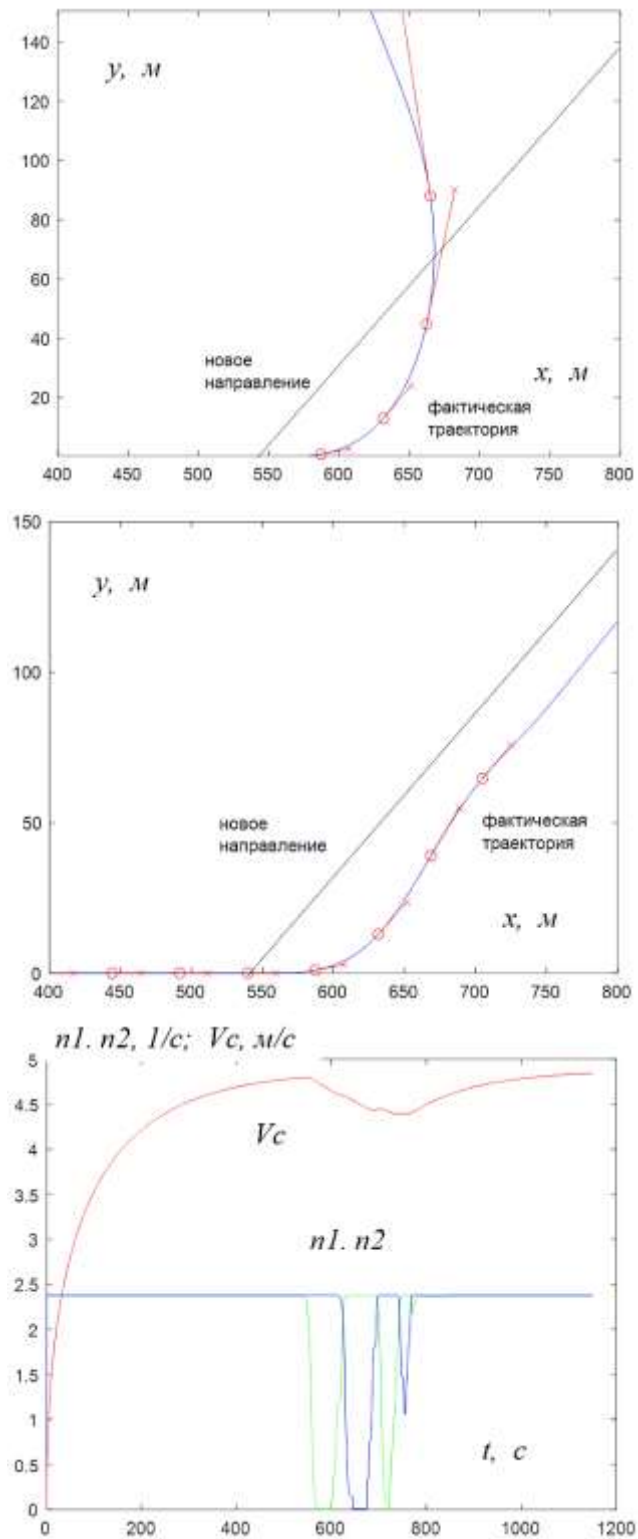


Рис. 2. Переход судна на новый курс: а – с использованием третьего члена (1), б, в – при исключении третьего члена в (1)

На рис. 2в показано изменение скорости судна V_c (наблюдается падение более, чем на 8%), а также изменения частот вращения гребных колес. В этом случае наблюдается очень энергонапряженный режим управления – частоты вращения меняются в пределах 100%, что неприемлемо для практики. К недостаткам алгоритма можно отнести существенное запаздывание процесса поворота при его инициации в заданной точке, т.е. необходимо начинать поворот заранее, не доходя до точки поворота.

Синтез алгоритма управления судном при маневрировании

Высокое качество управления можно получить, используя знания динамических особенностей объекта. Это позволяет сформировать некоторую траектории перехода из одного состояния в другое, «сшитую» из собственных движений объекта, что позволяет осуществить переход из одного состояния в другое при минимальных управляющих воздействиях. Для неустойчивого на курсе судна в фазовом пространстве координат имеется три стационарных состояния: два устойчивых (соответствуют правой и левой циркуляциям) и одно неустойчивое (движение заданным курсом). В данном случае задача управления сводится к переводу объекта из одного квазиустановившегося состояния (движение по первому участку траектории) в другое (движение по второму участку траектории на рис. 1). В качестве «соединения» этих двух участков может быть использован участок траектории циркуляции судна (движение судна в режиме циркуляции является собственным движением и не требует затрат энергии на управление). На рис.1 представлены два возможных варианта перехода судна с одного курса на другой.

Параметры циркуляции (радиус, скорость движения судна) полностью определяются соотношением частот вращения гребных колес [8]. На рис. 3 представлены две возможных траектории движения судна при различных соотношениях частот вращения гребных колес.

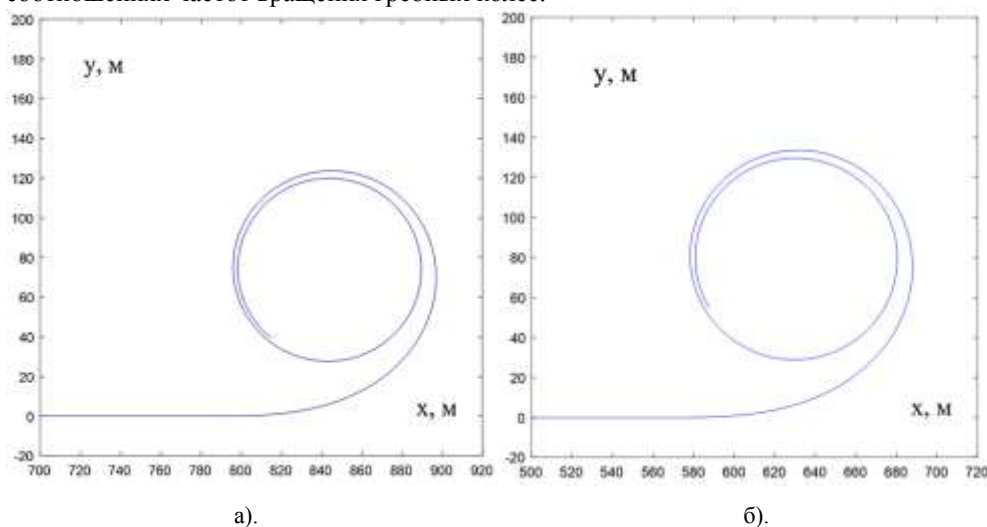


Рис. 3. Выход на циркуляцию: (а) при $n_2 = n_{max} = 1, n_1 = 0$;
(б) при $n_2 = 0,75, n_1 = 0$

Необходимо отметить, что при заходе на циркуляцию ее радиус меняется от бесконечности до установившегося значения за довольно значительный период времени. Т.е. использовать для перехода с одного курса на другой участок циркуляции с установившимся радиусом, как показано на рис. 1, некорректно.

Участок траектории движения судна при заходе на циркуляцию можно заменить на окружность радиуса R_c , близко совпадающую на участке от точки (б) до точки (г) с реальной траекторией движения судна. Радиус R_c аппроксимирующей окружности вычисляется по точкам траектории движения судна, рассчитанных на интервале (б – в – г).

Аппроксимирующие окружности представлены на рис.4

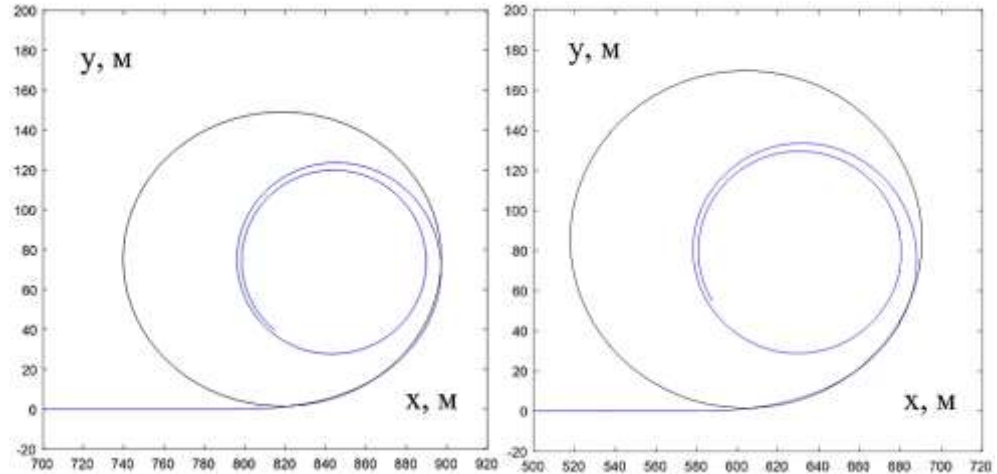


Рис. 4. Аппроксимирующие окружности траектории выхода на циркуляцию

На рис. 5 представлена зависимость установившегося радиуса циркуляции от скорости судна и соотношения частот вращения гребных колес.

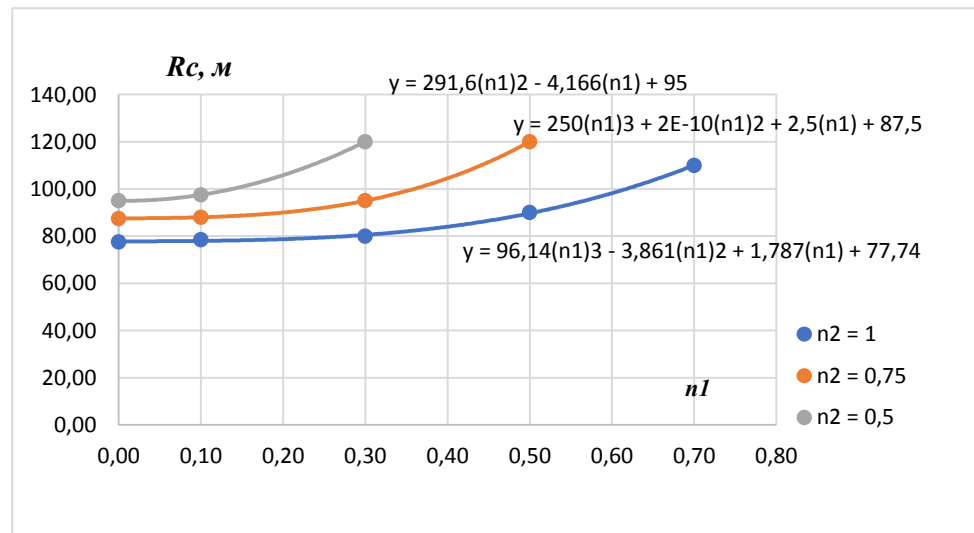


Рис. 5. Зависимость радиуса аппроксимирующей окружности выхода на циркуляцию от частоты вращения гребных колес

В общем случае зависимость радиуса аппроксимирующей окружности от частоты вращения гребных колес будет иметь вид:

$$R_c = (-3230 n_2^2 + 5038 n_2 - 1711)n_1^3 + (2302 n_2^2 - 4044 n_2 + 1738) n_1^2 + (-59 n_2^2 + 100 n_2 - 40)n_1 + (-35 n_2 + 113)$$

Начальный участок процесса перехода на новый курс представлен на рис. 6. Маневр по изменению курса начинается в точке (а). На рисунке представлен заход судна на циркуляцию при максимальной скорости при $n_2 = n_{max} = 1$ и $n_1 = 0$. На участке (а – б) наблюдается медленный уход судна с прямолинейной траектории: в точке (б) он составляет 1 м, что приемлемо на практике для судна размером 82*14 м). Как показывают результаты моделирования, участок (а-б) при различных скоростях движения судна и соотношениях частот вращения гребных колес меняется в весьма узких пределах (не более 7% от длины судна) и может быть принят постоянным ($\Delta = 46$ м) для различных режимов.

Это позволяет вычислить точки входа в режим циркуляции и выхода из этого режима. Начало перехода на новый курс (точка (а)) – на расстоянии $L + Rc/ctg(\alpha/2)$ от точки поворота (в), конец маневра и переход на новую траекторию (точка (г)) – на расстоянии $Rc/ctg(\alpha/2)$ от точки поворота, где α – величина изменения курса.

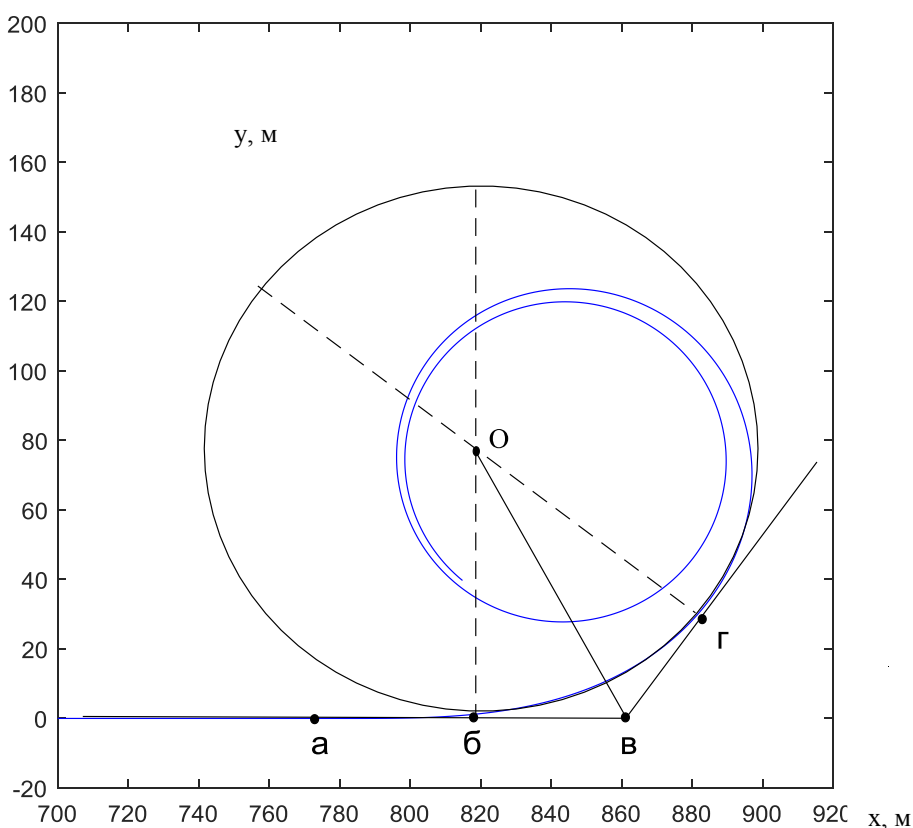


Рис.6. Начальный участок процесса перехода на новый курс

Другим сложным фактором является определение точки выхода из циркуляции. Выход на прямолинейную траекторию также нельзя начинать в момент достижения заданного угла поворота, т.к. набранная угловая скорость не может быть погашена мгновенно и создает существенное отклонение от заданной траектории. Проблема с правильным определением отклонения и выходом из циркуляции может быть решена с помощью введения дополнительной системы координат в каждой точке поворота (рис.7).

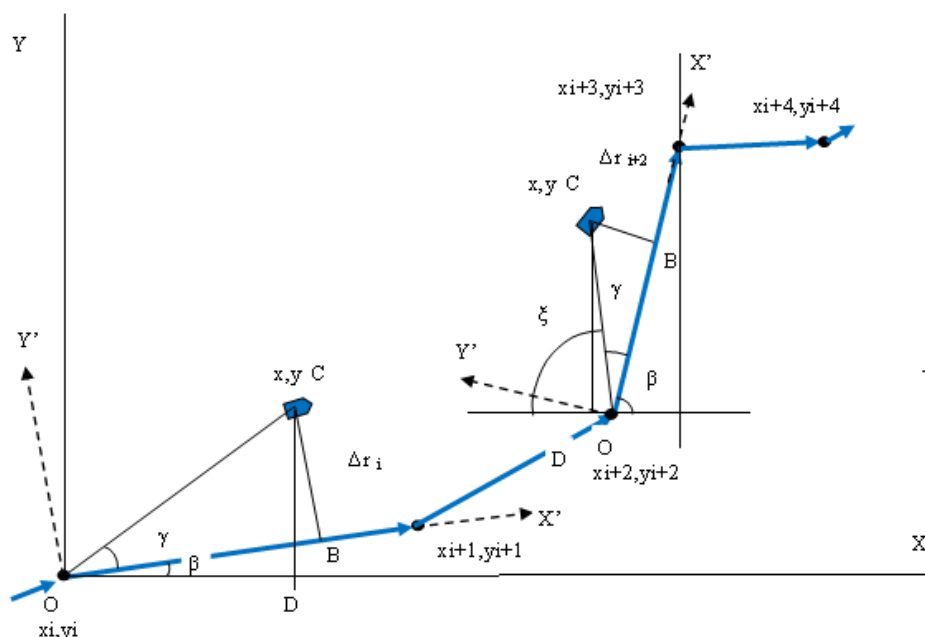


Рис. 7. Расчетная схема для определения отклонения судна от траектории

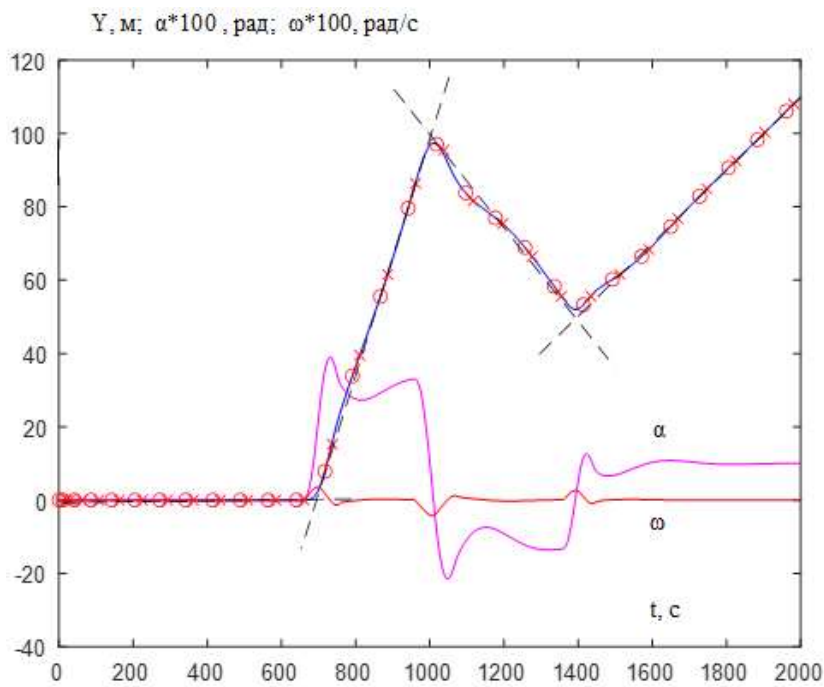
Во вспомогательной функции R (1) третий член служит для компенсации отклонения от траектории при движении судна вдоль оси x . В реальности траекторию движения судна можно представить в виде набора прямолинейных отрезков, соединяющих заданные путевые точки (на рис. 7 траектория движения выделена синим цветом). Для определения отклонения судна от траектории движения в произвольный момент времени ($\Delta r = BC$ на рис. 7) введена подвижная система координат $x'y'$. Начало системы координат $x'y'$ совпадает с точкой поворота, ось x' направлена вдоль траектории движения судна. Для любой точки траектории отклонения будет равно:

$$\Delta r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} * \sin(\arctg\left(\frac{y - y_i}{x - x_i}\right) - \arctg\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right))$$

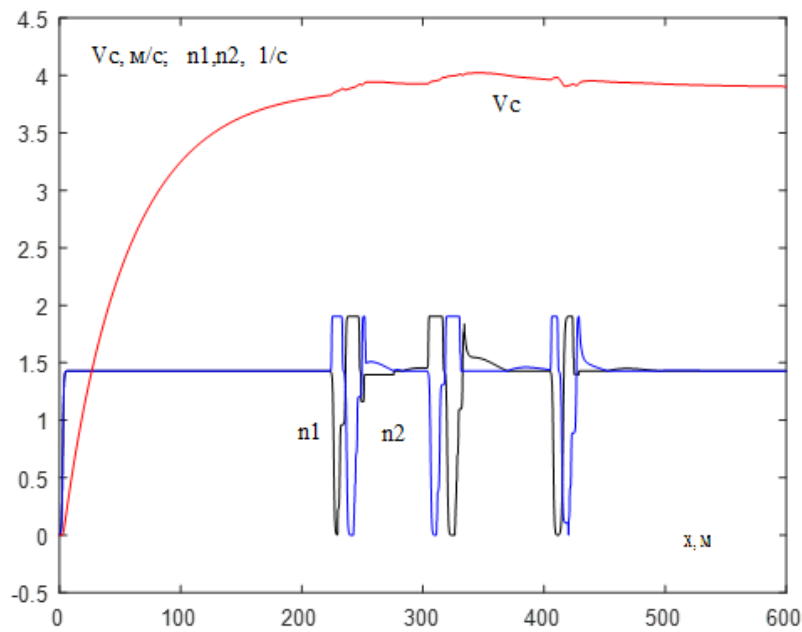
Результаты

На рис. 8а представлены результаты математического моделирования движения колесного судна по заданной траектории при скорости судна $V_c = 0,75 V_{max}$.

Алгоритм управления, использующий собственные движения судового комплекса корпус – движители – система управления, обеспечивает движение по сложной траектории с допустимыми на практике отклонениями. При этом при выполнении поворотов наблюдается минимальное количество переключений электроприводов гребных колес (рис. 7б). Минимизация механических нагрузок на приводы колес обеспечивает увеличение межремонтных периодов. Скорость судна при совершении маневров меняется незначительно.



а).



б).

Рис. 8. Динамические характеристики судна при движении по заданной траектории: а – траектория движения, курс и угловая скорость поворота судна; б – скорость судна и частота вращения гребных колес

Заключение

Таким образом, изучение динамики судна позволяет реализовывать управление с высокими качественными показателями, использующее собственные движения объекта. Движение по траектории, «сшитой» из собственных движений объекта позволяет осуществить переход из одного состояния в другое при минимальных управляющих воздействиях. Это обеспечивает снижение механических нагрузок на приводы и экономию топлива.

Список литературы

1. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HofTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата доступа: 25.08.2022).
2. Положение по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) Российский морской регистр судоходства. С.-Петербург, 2020
3. Felski, A.; Zwolak, K. The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats - Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8, 41. <https://doi.org/10.3390/jmse8010041>
4. Krzysztof Wróbel, JakubMontewka, Pentti Kujala. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. Reliability Engineering & System Safety Volume 165, September 2017, Pages 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.029>
5. Ahvenjärvi S. The Human Element and Autonomous Ships. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, pp. 517-521, 2016
6. Галкин Д.А., Малый Ю.А. От «Суры» к «Золотому кольцу». Речной транспорт (XXI век). 2015. №2(73). с. 32–33.
7. Бурда Е.М., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И. Комплексная автоматизация технологических процессов колесных судов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4 Т.1. С.180-1882. <https://doi.org/10.37220/МИТ.2021.54.4.049>
8. Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Математическая модель судна с колесным движителем – рулевым комплексом «Золотое кольцо». Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. - Астрахань. 2018. №3. С.36-46. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-3-36-49>
9. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Динамика судна с колесным движителем-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 Т.2. С.139-146.

References

36. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HofTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (accessed: 25.08.2022).
37. Regulation on the Classification of Marine Autonomous and Remotely Controlled Surface Vessels (MHF) Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2020Felski, A.; Zwolak, K. The Ocean-Going Autonomous Ship—Challenges and Threats - Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8, 41.
38. Krzysztof Wróbel, JakubMontewka, Pentti Kujala. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. Reliability Engineering & System Safety Volume 165, September 2017, pp. 155-169.
39. Ahvenjärvi S. The Human Element and Autonomous Ships. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, pp. 517-521, 2016
40. Galkin D.A., Maliy Yu.A. From "Sura" to "Golden Ring." River transport (XXI century)). 2015. №2(73). Pp. 32-33.

41. Burda EM, Perevezentsev SV, Plyushchaev V.I. Integrated automation of technological processes of wheeled vessels. *Marine Intelligent Technologies*. 2021. No. 4 T.1. pp.180-1882.
42. Bychkov V.Ya., Grosheva LS, Plyushchaev V.I. Mathematical model of a vessel with a wheeled propulsion - steering complex "Golden Ring." *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Ser. Marine machinery and technology.* -Aastrahan. 2018. №3. Pp. 36-46.
43. Bychkov V.Ya., Grosheva LS, Plyushchaev V.I. Dynamics of a vessel with a wheeled propulsion and steering system in external conditions. *Marine Intelligent Technologies*. 2019. No. 4 T.2. pp. 139-146.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Грошева Людмила Серафимовна, к.т.н.,
доцент кафедры радиоэлектроники,
«Волжский государственный университет
водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Ludmila S. Grosheva, Ph.D. (Eng), assistant
professor of the Department of Radio
Electronics, Volga State University of Water
Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod,
603951

Плющаев Валерий Иванович, профессор,
д.т.н., зав кафедрой радиоэлектроники,
«Волжский государственный университет
водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: vip3345@yandex.ru

Valery I. Plyushchaev, Professor, Doctor of
Technical Sciences, Head of the Department of
Radio Electronics, Volga State University of
Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny
Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; опубликована онлайн 20.03.2023.
Received 14.11.2022; published online 20.03.2023.