

УДК 681.51(075.8)

П.В. КАШТАЛЬЯН, С.А. РОЖКОВ
Херсонская государственная морская академия
Т.И. ТЕРНОВАЯ

Херсонский национальный технический университет

ДЕКОМПОЗИЦИЯ В ЗАДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Данная работа посвящена решению задачи декомпозиции системы управления стабилизацией координат морского судна.

В статье рассмотрен вопрос построения математической модели судна, как динамического объекта в поле возмущающих сил, получена обобщенная модель объекта и его декомпозиция. Современные технологии и задачи мореплавания выдвинули задачу позиционирования судов. Расширение объема работы на шельфе, обслуживание платформ и оперативные работы требует точного позиционирования при значительном волнении. Возникает все больше приложений динамического позиционирования (ДП), появляются новые классы судов для этих приложений, а сами системы ДП становятся более массовыми и дешевыми. Таким образом, актуальна разработка методов и средств повышения точности позиционирования. В работе показано, что данная задача относится к задачам с распределенными параметрами, а модель судна имеет второй порядок. Поставлена задача анализа методов регулирования используемых для динамического позиционирования.

Не смотря на значительные усилия разработчиков и большое количество реализованных проектов, достичь длительного удержания судна при волнении в заданной позиции не удается. Причиной этого является не только недостаток энерговооруженности используемых судов. Многочисленные исследования в области развития систем регулирования пока не дают ожидаемого результата. Исходя из сложившейся ситуации, в статье предпринята попытка анализа методов построения систем регулирования и разработки алгоритма точного позиционирования судна при энергии волнения, не превышающей энерговооруженности объекта (судна). В результате проведенного исследования были сделаны следующие выводы: 1) задача динамического позиционирования является задачей с распределенными параметрами; 2) описание судна, как объекта регулирования, представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка; 3) декомпозиция задачи регулирования координат плавающего средства позволяет выделить отдельную подсистему динамического позиционирования; 4) учитывая, что использование современных методов регулирования не позволяет создать системы способные длительно сохранять необходимую точность позиционирования, требуется анализ используемых методов регулирования.

Ключевые слова: динамическое позиционирование, декомпозиция, энергообеспечение судна.

П.В. КАШТАЛЬЯН, С.О. РОЖКОВ
Херсонська державна морська академія
Т.І. ТЕРНОВА

Херсонський національний технічний університет

ДЕКОМПОЗИЦІЯ В ЗАДАЧІ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Дана робота присвячена вирішенню задачі декомпозиції системи управління стабілізацією координат морського судна.

У статті розглянуто питання побудови математичної моделі судна, як динамічного об'єкта в полі сил, що збурюють, отримано узагальнену модель об'єкта і його декомпозицію. Сучасні технології і зачі мореплавання висунули задачу позиціонування суден. Розширення обсягу роботи на шельфі, обслуговування платформ і оперативні роботи вимагають точного позиціонування при значному хвилюванні. Виникає все більше додатків динамічного позиціонування (ДП), з'являються нові класи судів для цих додатків, а самі системи ДП стають більш масовими і дешевими. Таким чином, актуальна розробка методів і засобів підвищення точності позиціонування. В роботі показано, що дана задача відноситься до задач з розподіленими параметрами, а модель судна має другий порядок. Поставлено завдання аналізу методів регулювання використовуваних для динамічного позиціонування.

Не дивлячись на значні зусилля розробників і велику кількість реалізованих проектів, досягти тривалого утримання судна при хвилюванні в заданій позиції не вдається. Причиною цього є не лише брак енергоозброєності використовуваних судів. Численні дослідження в області розвитку систем регулювання поки не дають очікуваного результату. Виходячи з ситуації, що склалася, в статті зроблено спробу аналізу методів побудови систем регулювання і розробки алгоритму точного позиціонування судна при енергії хвилювання, що не перевищує енергоозброєності об'єкта (судна). В результаті проведеного дослідження були зроблені наступні висновки: 1) задача динамічного позиціонування є задачею з розподіленими параметрами; 2) опис судна, як об'єкта регулювання, являє собою диференціальне рівняння в приватних похідних другого порядку; 3) декомпозиція задачі регулювання координат плаваючого засобу дозволяє виділити окрему підсистему динамічного позиціонування; 4) з огляду на те, що використання сучасних методів регулювання не дозволяє створити системи здатні довго зберігати необхідну точність позиціонування, потрібен аналіз використовуваних методів регулювання.

Ключові слова: динамічне позиціонування, декомпозиція, енергозабезпечення судна.

P.V. KASHTALYAN, S.A. ROZHKOV

Kherson State Maritime Academy

T.I. TERNOVAYA

Kherson National Technical University

DECOMPOSITION IN THE PROBLEM OF DYNAMIC POSITIONING

This paper is devoted to solving the problem of decomposition of the control system for stabilization of the coordinates of a marine vessel.

The article discusses the issue of building a mathematical model of a ship as a dynamic object in the field of perturbing forces, and a generalized model of the object and its decomposition are obtained. Modern technologies and tasks of navigation put forward the task of positioning ships. Expansion of work on the shelf, maintenance of platforms and operational work requires precise positioning with considerable excitement. More and more dynamic positioning (DP) applications are emerging, new classes of vessels for these applications are emerging, and DP systems themselves are becoming more widespread and cheaper. Thus, the development of methods and means of improving the accuracy of positioning is relevant. The paper shows that this task is related to tasks with distributed parameters, and the ship model is of the second order. The task is to analyze the regulation methods used for dynamic positioning.

In spite of the significant efforts of the developers and the large number of completed projects, it is not possible to achieve a long vessel retention during a wave in a given position. The reason for this is not only the lack of power supply of the ships used. Numerous studies in the development of regulatory systems do not yet provide the expected result. Based on the current situation, the article attempts to analyze the methods for constructing regulatory systems and develop an algorithm for accurately positioning a vessel at a wave energy not exceeding the electrical capacity of the object (vessel). As a result of the study, the following conclusions were made: 1) the problem of dynamic positioning is a task with distributed parameters; 2) the description of the vessel as an object of regulation is a second-order partial differential equation; 3) decomposition of the task of controlling the coordinates of the floating means allows you to select a separate dynamic positioning subsystem; 4) given that the use of modern methods of regulation does not allow creating systems capable of maintaining the necessary positioning accuracy for a long time, analysis of the methods of regulation used is required.

Keywords: dynamic positioning, decomposition, power supply of the vessel.

Постановка проблемы

Современные технологии и задачи мореплавания выдвинули задачу позиционирования судов. Расширение объема работы на шельфе, обслуживание платформ и оперативные работы требует точного позиционирования при значительном волнении. Возникает все больше приложений динамического позиционирования (ДП), появляются новые классы судов для этих приложений, а сами системы ДП становятся более массовыми и дешевыми. Таким образом, актуальна разработка методов и средств повышения точности позиционирования.

Однако, не смотря на значительные усилия разработчиков и большое количество реализованных проектов, достичь длительного удержания судна при волнении в заданной позиции не удастся [6, 8, 11, 13]. Причиной этого является не только недостаток энерговооруженности используемых судов. Многочисленные исследования в области развития систем регулирования пока не дают ожидаемого результата. Исходя из сложившейся ситуации, в статье предпринята попытка анализа методов построения систем регулирования и разработки алгоритма точного позиционирования судна при энергии волнения, не превышающей энерговооруженности объекта (судна).

Анализ последних исследований и публикаций

Современные технологии добычи полезных ископаемых на морском шельфе, задачи строительства и проведения аварийных работ требуют обеспечения неподвижности судна в географических координатах [1, 2]. Собственно, проблема определения координат решается достаточно широким спектром методов. Автоматические системы управления гидроплатформами позволяют обеспечить определение отклонений в пределах нескольких сантиметров, спутниковые системы обеспечивают диапазон до десятка сантиметров, оптические системы обеспечивают точность в пределах десятков метров и радионавигационные системы обеспечивают предварительную привязку объекта [3]. Однако существует вторая сторона медали – удержать судно в данной точке с заданной точность [4, 5]. Эта задача подразумевает регулирование в пространстве координат [6], и при этом возникает ряд вопросов о построении математической модели объекта управления (судна) [7, 8]. Говоря о математических моделях, описывающих динамику судна, выделим прежде всего фундаментальные исследования, в которых рассматривают судно как объект с распределенными параметрами [9].

Цель исследования

Даная работа посвящена решению задачи декомпозиции системы управления стабилизацией координат морского судна.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим окрестности судна под воздействием внешних возмущений: волнения, течений и ветровых потоков. Опишем среду в виде трех векторных полей: $F_1(x)$ – векторное поле воздушной среды, $F_2(x)$ – векторное поле волнового слоя, $F_3(x)$ – векторное поле течений, где вектор x имеет координаты x, y, z . В этом случае, определяя векторные поля, как поля силы в каждой точке пространства, можно определить вектор возмущения как

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } z_{\max} \geq z \geq z_o \rightarrow \mathbf{F} = \mathbf{F}_1(\mathbf{x}) \\ \text{if } z_o \geq z \geq z_1 \rightarrow \mathbf{F} = \mathbf{F}_1(\mathbf{x}) \\ \text{if } z_1 \geq z \geq z_{\min} \rightarrow \mathbf{F} = \mathbf{F}_1(\mathbf{x}) \end{array} \right\} \quad (1)$$

Учитывая тот факт, что грани между слоями среды довольно условны, возможно разделить воздействия, если предположить равенство векторов каждого слоя. Собственно, таким образом можно разделить ветровое и волновое воздействия и воздействие течения. В таком случае каждый слой связан с воздействием на корпус судна.

Рассмотрим замкнутый цилиндр с контуром L в векторном пространстве $F(x)$ (рис. 1).

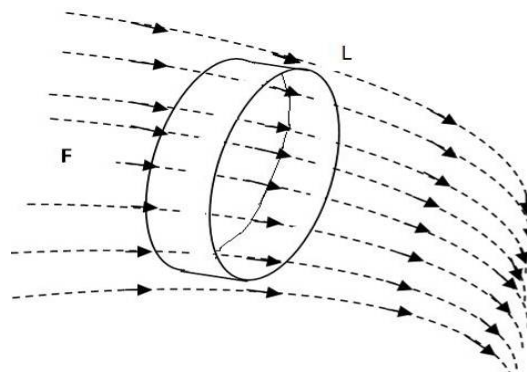


Рис. 1. Поле возмущений

Так как в пределах области L в поле нет источников и $\text{div}F(x)=0$, то поток вектора $F(x)$ через контур L должен быть равен нулю:

$$\Phi = \oiint_{S_L} \mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n} \, ds = 0. \quad (2)$$

Предположим, что поле возмущений взаимодействует с границей области L . Если воздействие возмущения приводит к смещению границ области, то условие сохранения области сводится к отсутствию возмущений на границе:

$$\Phi = \oiint_{S_L} \mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n} \, ds = 0 \rightarrow \mathbf{F}(\mathbf{x})_{x \in L} = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Таким образом, в каждой точке x , принадлежащей L должна действовать сила, компенсирующая поле возмущений:

$$F(x)_{x \in L} - U(x)_{x \in L} = 0. \quad (4)$$

В предположении (1) при условии (2) и (3) требование наличия компенсирующего поле возмущений F , поля управления U выражение (4) является простым рецептом динамического позиционирования.

На рис. 2 и рис. 3 показаны воздействия возмущающих полей на судно и взаимодействие возмущения и управления после совмещения поверхности L с поверхностью судна.

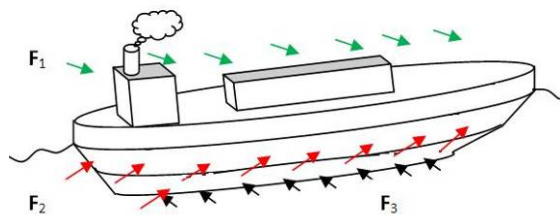


Рис. 2. Воздействие возмущающих полей на судно

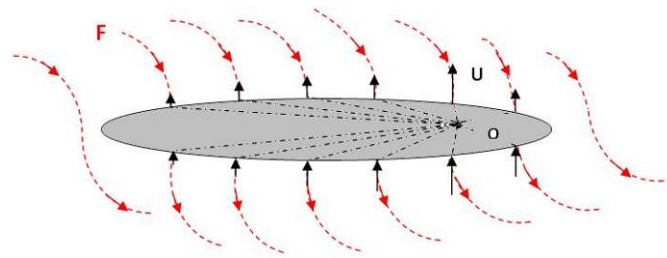


Рис. 3. Взаимодействие возмущения и управления

Очевидно, что во внутренней области, ограниченной поверхностью L , возмущающие поля не действуют. Следовательно, в поле возмущения поверхность судна ограничивают область, где внешнее поле отсутствует. При этом предположим, что эта область не деформируется, а поле управления формируется за счет нескольких источников, создающих соленоидальные поля в лакуне и на ее границе (рис. 3).

Однако мы имеем дело с динамическим объектом, находящимся под воздействием поля возмущающих сил. Описать динамику объекта достаточно сложно, но в данном случае возможно воспользоваться принципом Геймгольца, который утверждает, что любое векторное поле можно представить суммой потенциального и соленоидального полей. Таким образом, движение системы содержит аperiodическую и колебательную составляющие. Опираясь на принцип Гамильтона можно утверждать, что дифференциальные уравнения, описывающие движение должны иметь минимальный порядок [14].

Таким образом, поле $F(x)$ связанное с объектом определяется сумой двух полей, потенциального $\Phi(x)$ и соленоидального $\Psi(x)$, при этом выполняются условия:

$$\begin{aligned} F(x) &= \Phi(x) + \Psi(x); \\ \text{rot}\Phi(x) &\equiv 0; \\ \text{grad}\Psi(x) &\equiv 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для потенциальной составляющей поля справедливо [10]:

$$\iiint_{\Omega} \text{div}F \, dv = \iint_{S_{\Omega}} F \, ds. \quad (6)$$

Для объекта с неизменной геометрией, в каждой точке в границах объекта, условие (6) выполняется сильно и как следствие равны подынтегральные выражения:

$$\operatorname{div} \mathbf{F} d\mathbf{v} = \mathbf{F} ds. \quad (7)$$

Совместив направляющий вектор площадки с векторной линией, из (7) получаем:

$$\left(\operatorname{div} \mathbf{F} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \right) ds = \mathbf{F} ds. \quad (8)$$

Следовательно, для потенциальной компоненты в (5) должно выполняться уравнение:

$$\operatorname{div} \mathbf{F} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} = \mathbf{F}. \quad (9)$$

С другой стороны, для соленоидальной компоненты выполняется условие [10]:

$$\oint_L \mathbf{F} d\mathbf{l} = \iint_{S_L} \operatorname{rot} \mathbf{F} \hat{\mathbf{c}} s. \quad (10)$$

Для недеформируемого тела при совмещении вектора $d\mathbf{l}$ с векторной линией поля из (10), получаем:

$$\mathbf{F} d\mathbf{l} = \operatorname{rot} \mathbf{F} \hat{\mathbf{c}} s. \quad (11)$$

Или, за счет связи направления нормали и векторной линии, можем записать (11) в виде:

$$\mathbf{F} d\mathbf{l} = (\operatorname{rot} \mathbf{F} d\mathbf{x}) d\mathbf{l}. \quad (12)$$

Или, учитывая, что произведение ротора поля на вектор смещения определяет момент инерции, можем записать:

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} = (\operatorname{rot} \mathbf{F} d\mathbf{x}) = -m V \mathbf{x}. \quad (13)$$

Для соленоидальной компоненты поля из (12, 13) выполняется условие:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} + V \mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad (14)$$

где матрица V состоит из детерминантов, определяющих изменение момента при смещении на $d\mathbf{x}$.

Так как должен выполняться принцип Гейгюна, совместим оба условия: (9) и (14), – в одно:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} + \operatorname{div} \mathbf{F} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} + V \mathbf{x} = \mathbf{F}. \quad (15)$$

При учете возмущающих сил из (15) получаем:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} + \operatorname{div} \mathbf{F} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} + \mathbf{V} \mathbf{x} = \mathbf{F} + \mathbf{Q}. \quad (16)$$

Полученное уравнение (16) описывает движение динамического, недеформируемого объекта в поле возмущающих сил. Собственно, это уравнение показывает, что судно не только смещается в системе координат, но и совершает колебательные движения относительно этих координатных осей.

При этом возможно ставить задачу стабилизации объекта при помощи поля управлений $U(x)$. Существенно то, что в данном случае линеаризация дает не систему Коши первого порядка, а систему второго порядка:

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = D \frac{d\mathbf{x}}{dt} + A\mathbf{x} + B\mathbf{u} = Q\mathbf{q}. \quad (17)$$

Второй порядок дифференциального уравнения (17) является минимально возможным для одновременного описания колебательного и поступательного движений, что соответствует структуре задачи. При этом всегда можно разбить движения на смещения и вращения относительно осей координат [11], что приводит к декомпозиции (разделению) задачи на стабилизацию курсового угла и кренов судна.

Разделив вектор состояния на подвекторы, получим:

$$\mathbf{x}_x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_y = \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_z = \begin{bmatrix} z \\ x \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Тогда линеаризованная модель может быть разделена на подсистемы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{x}_x}{dt^2} &= D_x \frac{d\mathbf{x}_x}{dt} + A_x \mathbf{x}_x + B_x \mathbf{u}_x = Q_x \mathbf{q}_x; \\ \frac{d^2 \mathbf{x}_y}{dt^2} &= D_y \frac{d\mathbf{x}_y}{dt} + A_y \mathbf{x}_y + B_y \mathbf{u}_y = Q_y \mathbf{q}_y; \\ \frac{d^2 \mathbf{x}_z}{dt^2} &= D_z \frac{d\mathbf{x}_z}{dt} + A_z \mathbf{x}_z + B_z \mathbf{u}_z = Q_z \mathbf{q}_z; \\ \frac{d^2 \mathbf{x}_0}{dt^2} &= D_0 \frac{d\mathbf{x}_0}{dt} + A_0 \mathbf{x}_0 + B_0 \mathbf{u}_0 = Q_0 \mathbf{q}_0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Первые три подсистемы (19) стабилизируются достаточно точно соответствующими регуляторами курса, килевой и бортовой качки [11, 12]. Более сложным оказалось обеспечить точное позиционирование по координатам \mathbf{x}_0 , \mathbf{y}_0 . Несмотря на достаточно большое количество работ по данной проблеме, реализовать систему, обеспечивающую точное позиционирование при существенных возмущениях, не удается [13].

Задача данной работы определена как решение проблемы динамического позиционирования, поэтому считаем влияние качки судна устраненными.

Ошибка, связанная с описанием объекта системой первого порядка, ухудшает результаты, однако в современную систему управления входит алгоритм идентификации и ошибка порядка системы может быть снижена.

Таким образом, ставится задача определения причины затруднений в реализации современных алгоритмов регулирования в задаче динамического позиционирования судна.

Выводы

Задача динамического позиционирования является задачей с распределенными параметрами.

Описание судна, как объекта регулирования, представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка.

Декомпозиция задачи регулирования координат плавающего средства позволяет выделить отдельную подсистему динамического позиционирования.

Учитывая, что использование современных методов регулирования не позволяет создать системы способные длительно сохранять необходимую точность позиционирования, требуется анализ используемых методов регулирования.

Список использованной литературы

1. Шостак В. П. Динамическое позиционирование плавучих объектов. Чикаго, Мегатрон, 2010. 130 с.
2. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. Ongsberg K-Pos DP IMO, International maritime organization MSC/Circ. 645 (1994) URL: <http://imo.udhb.gov.tr/dosyam/EKLER/MSC-Circ.645.pdf>
3. Быковский А. В. и др. Повышение точности инерциальных навигационных систем с использованием внешней информации. Москва: МГТУ, 1989. 148 с.
4. Фрейдзон И. Р., Филипов Л. Г. Автоматические системы динамического удержания буровых судов. Судостроение за рубежом. 1980. № 1. С. 13-27.
5. Integrated Dynamic Positioning System (DPS-1) Technical Description. (2018) URL: www.emi-marine.com.
6. Thor I. Fossen. (2005) A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway. *Journal of Bifurcation and Chaos*. 15 (9), 2717-2746. DOI: 10.1142/S0218127405013691
7. Чижиумов С. Д. Основы динамики судов на волнении. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО "КнАГТУ", 2010. 110 с.
8. Thor I. Fossen, Tristan Perez. (2009) Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs. *IEEE Control Systems Magazine*. 29, 6, 32-46.
9. Зубова А. А. Моделирование гидродинамического взаимодействия судов на основе методов вычислительной гидродинамики: дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2015.
10. Будак Б. М., Фомин С. В. Кратные интегралы и ряды. Москва: Наука, 1965. 607 с.
11. Asgeir J. Sørensen. Marine Control Systems Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures. Lecture Notes. Report UK-13-76. Trondheim: Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology, 2013. 525 p.
12. Лукомский Ю. А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. Ленинград: Судостроение, 1988. 272 с.
13. Мирошников А. Н., Антоненко В. П. (2018) Системы динамического позиционирования: новые задачи и тенденции развития. URL: http://korabel.ru/news/comments/_dinamicheskogo_pozicionrovaniya_novye_zadachi_i_tendencii_razvitiya_2html
14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.

References

1. Shostak, V. P. (2010) *Dinamicheskoe pozitsionirovanie plavuchih ob'ektov*. Chikago, Megatron.
2. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. Ongsberg K-Pos DP IMO, International maritime organization MSC/Circ. 645. (1994) Retrieved from <http://imo.udhb.gov.tr/dosyam/EKLER/MSC-Circ.645.pdf>
3. Byikovskiy, A. V. i dr. (1989) *Povyishenie tochnosti inertsialnyih navigatsionnyih sistem s ispolzovaniem vneshney informatsii*. Moscow: MGTU.
4. Freydzon, I. P., & Fillipov L. G. (1980) *Avtomaticheskie sistemyi dinamicheskogo uderzhaniya burovnyih sudov*. Sudostroenie za rubezhom. 1, 13-27.
5. Integrated Dynamic Positioning System (DPS-1) Technical Description. (2018) Retrieved from www.emi-marine.com.
6. Thor I. Fossen. (2005) A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway. *Journal of Bifurcation and Chaos*. 15 (9), 2717-2746. DOI: 10.1142/S0218127405013691
7. Chizhiumov, S. D. (2010) *Osnovyi dinamiki sudov na volnenii*. Komsomolsk-na-Amure: GOUVPO "KnAGTU".
8. Thor, I. Fossen, Tristan Perez. (2009) Kalman Filtering for Positioning and Heading Control of Ships and Offshore Rigs. *IEEE Control Systems Magazine*. 29, 6, 32-46.
9. Zubova, A. A. (2015) *Modelirovanie gidrodinamicheskogo vzaimodeystviya sudov na osnove metodov vychislitelnoy gidrodinamiki* (PhD Thesis), Sankt-Peterburg, 2015.
10. Budak B. M., & Fomin S. V. (1965) *Kratnyie integraly i ryadyi*. Moskva: Nauka.
11. Asgeir, J. Sørensen. (2013) *Marine Control Systems Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures*. Lecture Notes. Report UK-13-76. Trondheim: Department of Marine Technology Norwegian University of Science and Technology.
12. Lukomskiy, Yu. A., & Chugunov, V. S. (1988) *Sistemyi upravleniya morskimi podvizhnyimi ob'ektami*. Leningrad: Sudostroenie.
13. Miroshnikov A. N., Antonenko V. P. (2018) *Sistemyi dinamicheskogo pozitsionirovaniya: novyie zadachi i tendentsii razvitiya*. Retrieved from http://korabel.ru/news/comments/_dinamicheskogo_pozicionirovaniya_novye_zadachi_i_tendentsii_razvitiya_2html
14. Krasovskiy, A. A. (Ed.) (1987) *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz. -mat. lit.