

УДК: 519.876.5

EDN: [WAELRU](https://www.edn.net/WAELRU)

DOI: <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-3-0301-0311>



Моделирование тонкопленочной печатной катушки индуктивности для УКВ радиоприемника

И. Н. Карцан¹, Д. К. Цапик², Д. Г. Кузнецов³

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия

²ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

³ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. При разработке и моделировании индукторов единственными практическими вариантами являются проволочные соединения и плоские геометрические формы. Несмотря на то, что проволочные соединения позволяют достичь высокого коэффициента качества, их значения индуктивности ограничены и могут быть довольно чувствительны к колебаниям. Плоские спиральные индукторы имеют ограниченные значения, но обладают индуктивностью, которая хорошо определяется в широком диапазоне вариаций процесса. Рассмотрено прикладное применение программы Ansoft Maxwell при моделировании тонкопленочной печатной катушки для УКВ радиоприемника с перспективой использования на стационарной научно-исследовательской платформе, расположенной в прибрежной зоне Черного моря в акватории Голубого залива на расстоянии ~ 450 м от берега. Работа в дальнейшем направлена на использование программного продукта для полного цикла моделирования минимизированной элементной базы приемо-передающего оборудования.

Ключевые слова: радиоприемник, ультракоротковолновые волны, программа Ansoft Maxwell, плоская печатная катушка индуктивности, интегральная схема.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

Для цитирования: Карцан, И. Н., Цапик, Д. К. & Кузнецов, Д. Г. (2022). Моделирование тонкопленочной печатной катушки индуктивности для УКВ радиоприемника. *Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2(3), 0301–0311. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-3-0301-0311>

Modeling a thin film printed inductance coil for a VHF radio receiver

Igor Kartsan¹, Dmitry Tsapik², Dmitry Kuznetsov³

¹*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

²*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

³*Federal State Educational Institution of Higher Education "Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping" Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. When designing and modeling inductors, the only practical options are wire connections and flat geometric shapes, although, wire connections allow to achieve a high-quality factor, their inductance values are limited and can be quite sensitive to variations, flat spiral inductors have limited values, but have inductance, which is well defined in a wide range of process variations. The application of the program Ansoft Maxwell in the simulation of a thin-film printed coil for VHF radio receiver in the perspective of use on a stationary research platform located in the coastal zone of the Black Sea in the Blue Bay at a distance of ~ 450 m from the shore. Work in the future is aimed at using the software product for the full cycle of modeling the minimized element base of the receiving and transmitting equipment.

Keywords: radio receiver, ultrashort waves, Ansoft Maxwell software, flat printed inductance coil, integrated circuit.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Federation State Task No 0555-2021-0005.

For citation: Kartsan, I., Tsapik, D. & Kuznetsov, D. (2022). Modeling a thin film printed inductance coil for a VHF radio receiver. *Modern Innovations, Systems and Technologies*, 2(3), 0301–0311. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2022-2-3-0301-0311>

ВВЕДЕНИЕ

Все радиочастотные цепи используют индуктивность (L) и емкость (C) для резонансных емкостей при выборе частот. Кроме того, индуктивность может использоваться в схеме дегенерации источника для обеспечения резистивного входного импеданса в усилителях с общим источником, в качестве дросселя для высоких частот и т.д. С другой стороны, емкость часто используется в качестве блокировки пути постоянного тока (DC), для уменьшения колебаний источника питания и т.д.

В настоящее время возрастающий спрос на недорогие радиочастотные интегральные схемы вызвал огромный интерес к пассивным компонентам на кристалле [1-3]. Сегодня существует несколько вариантов интегральных резисторов и конденсаторов и большинство из них легко моделируются. Значительные усилия были также направлены на разработку и моделирование индукторов, единственными

практическими вариантами которых являются проволочные соединения и плоская спиральная геометрия. Хотя проволочные соединения позволяют достичь высокого коэффициента качества, их значения индуктивности ограничены и могут быть довольно чувствительны к колебаниям. С другой стороны, плоские спиральные индукторы имеют ограниченные значения, но обладают индуктивностью, которая хорошо определяется в широком диапазоне вариаций процесса. Таким образом, плоские спиральные индукторы стали важными элементами блоков коммуникационных схем, таких как генераторы, управляемые напряжением, малошумящие усилители, смесители и фильтры промежуточной частоты.

Реализация индуктивности в технологии интегральных схем (ИС) обычно использует тот же принцип, что и в дискретных элементах схемы, т.е. использование металлических проводов в качестве витков в индукторах. Но в отличие от структуры соленоида, витки в ИС не могут быть уложены друг на друга прямолинейно. Вместо этого они располагаются в виде плоских спиралей, в которых магнитная связь между витками не такая сильная, как в уложенных проводах. Кроме того, спиральные индукторы на кристалле строятся на кремниевой подложке с потерями. Все эти изменения структуры и влияние окружающей среды делают моделирование спиральных индукторов совершенно отличным от моделирования классических индукторов.

Моделирование конденсаторов на кристалле относительно просто по сравнению с моделированием индукторов. Но есть и некоторые особые вопросы, требующие внимания. Например, паразитная емкость между пластиной (пластинами) конденсатора и землей подложки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В начале работы определимся со схемой радиоприёмника, который в перспективе будет установлен на стационарной научно-исследовательской платформе, расположенной в прибрежной зоне Черного моря в акватории Голубого залива на расстоянии ~ 450 м от берега. Поскольку радиовещание в диапазоне ультракоротких волн (УКВ) на сегодняшний день выполняется исключительно с помощью частотно-модулированных (ЧМ) сигналов, преобразовать его в звуковую частоту с помощью прямого усиления «практически» невозможно.

Трюки с простыми детекторами амплитудно-модулированного (АМ) сигнала в природе ЧМ не работают. Традиционные схемы прямого преобразования на смесителях,

совмещенные с гетеродином, отошли на второй план, уступив схемам гетеродина с различными цепями стабилизации и компенсации.

Для определения необходимости использования в УКВ ЧМ приемниках отдельного гетеродина компания Philips проводила испытания, где представлена зависимость ухода частоты гетеродина от изменения уровня входного сигнала, поступающего в фазово-модулируемый (FM) тракт [2-6].

В СССР использовалась система с так называемым полярно модулированным (ПМ) сигналом. Эта система известна еще как стандарт OIRT (Organization Internationally de Radio diffusion et de Television – Организация радио и телевидения). Благодаря более низкой частоте поднесущей разностного сигнала 31,25 кГц, система УКВ OIRT имеет более узкий спектр комплексного стереосигнала, что теоретически позволяет разместить в УКВ-диапазоне большее число станций и улучшить использование мощности передатчика. В данном стандарте аудио сигнал модулирует поднесущую частоту таким образом, что в случае передачи стереосигнала огибающая положительных полупериодов модулирована сигналом левого стереоканала, а отрицательных – правого. В FM приемнике супергетеродинного типа с однократным преобразованием частоты, представленном на рисунке 1, при трансляции стереофонических программ после частотного детектора сигнал поступает на стереодекодер.

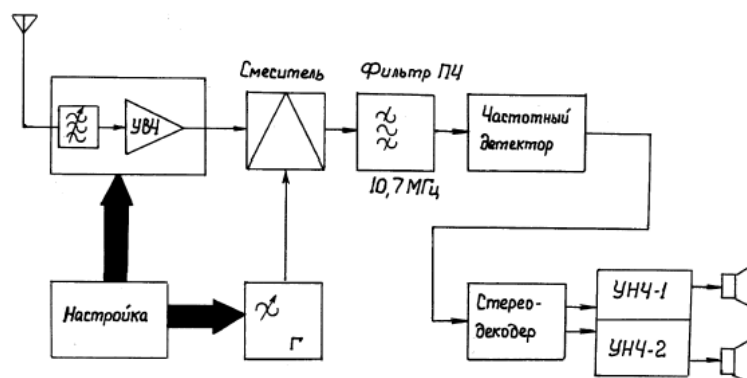


Рисунок 1. Функциональная схема FM приемника супергетеродинного типа с однократным преобразованием частоты.

Figure 1. Functional diagram of FM superheterodyne receiver with single frequency conversion.

В связи с комбинационными помехами, связанными с нелинейностью высокочастотного тракта и рядом сопутствующих проблем, в мире широкое применение получают специализированные интегральные микросхемы [4, 7-10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для производства расчетов и моделирования тонкопленочного колебательного контура была взята интересная, но довольно противоречивая схема на 5 транзисторах (рисунок 2). Приемный тракт УКВ-ЧМ диапазона собран всего на двух транзисторах VT1 и VT2 по простой схеме частотного детектора с ФАПЧ. На транзисторе VT2 построен так называемый генератор Колпица. Контур, состоящий из катушки L1, конденсатора C1 и внутренней емкости транзистора VT1, настраивается на частоту принимаемой радиостанции. Органом настройки приемника служит подстроечный конденсатор C1. Приемник обладает невысокой чувствительностью и селективностью, для приема нескольких радиостанции он не пригоден. Более того, тонкопленочные печатные контуры обладают невысокой добротностью, что тоже скажется на качестве приёма сигнала [5].

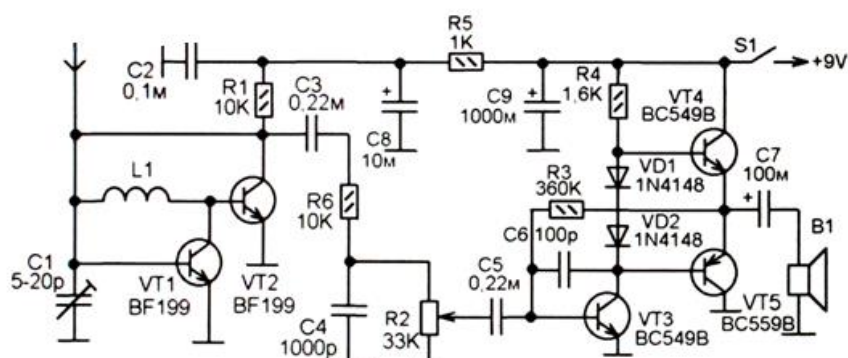


Рисунок 2. Принципиальная схема УКВ радиоприемника на пяти транзисторах, частотный детектор с фазовой автоподстройкой частоты.

Figure 2. Schematic diagram of VHF radio receiver on five transistors, frequency detector with phase locked-in frequency.

Работа данной схемы, весьма сомнительна, поскольку в ней отсутствуют какие-либо схемотехнические решения по стабилизации частоты. Однако, если до сих пор еще работают схемы детекторных радиоприёмников на длинноволновую и среднюю частоту с использованием германиевого диода в качестве АМ-детектора, то жизнеспособность данной схемы тоже вполне реальна, но при условии приёма самой мощной радиостанции.

Тонкопленочные печатные катушки индуктивности [11] в основном используются для уменьшения габаритов устройств, работающих в диапазонах

метровых и дециметровых волн. Форма исполнения может быть спиралью (как круглой, так и квадратной), а также в форме меандра (рисунок 3).

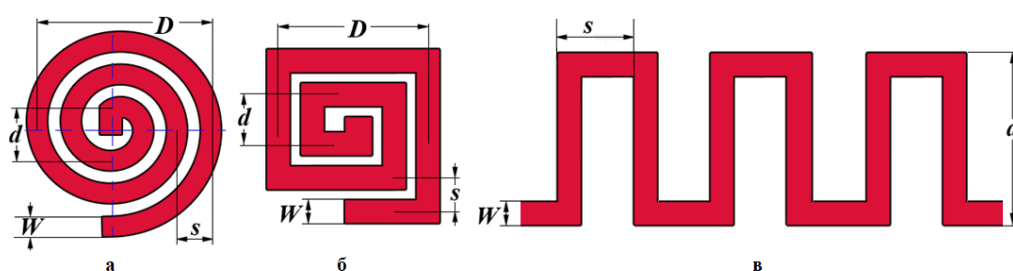


Рисунок 3. Плоские катушки индуктивности: а – круглой формы; б – квадратной формы; в – в форме меандр.

Figure 3. Flat inductor coils: a - circular shape; b - square shape; c - meander shape.

Плоские печатные катушки с круглой и квадратной формой витков рассчитываются по общей эмпирической формуле:

$$L = 0.5\mu_0 N^2 D_{avg} C_1 \left(\ln \left(\frac{C_2}{\varphi} \right) + C_3 \varphi + C_4 \varphi \right) \quad (1)$$

где - L- индуктивность (мкГн); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная; N - число витков; D_{avg} - средний диаметр катушки (мкм) $D_{avg} = \frac{D+d}{2}$; D - наружный диаметр спирали (мкм); d - внутренний диаметр спирали (мкм); φ - коэффициент заполнения $\varphi = \frac{D-d}{D+d}$; $C_1 \dots C_4$ – постоянные коэффициенты (для плоской квадратной катушки: $C_1=1,27$; $C_2=2,07$; $C_3=0,18$; $C_4=0,13$).

Погрешность расчета индуктивности по формуле (1) не превышает 8%, если промежуток между полосками не более двойной ширины полоски. Вещную радиостанцию используем с частотой 100 МГц.

Получаем расчётную геометрию колебательного контура с квадратной формой витков: L (индуктивность) - 211 нГн; D (наружный диаметр) - 25 мм; d (внутренний диаметр) - 10 мм; N (число витков) - 3.01; s (шаг намотки) - 2.492 мм.

Моделирование контура проводится в программе Ansoft Maxwell [12-14] (рисунок 4).

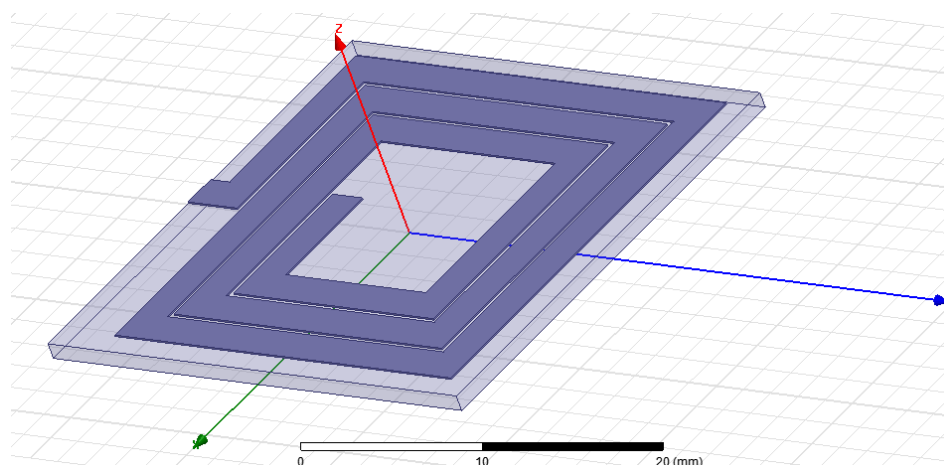


Рисунок 4. Модель плоской квадратной катушки индуктивности в программе Ansoft Maxwell.

Figure 4. Model of a flat square inductor coil in Ansoft Maxwell.

Материал подложки – стеклотекстолит (диэлектрическая проницаемость – 4.4), материал дорожек – медь.

Рассчитанное значение в программе 213 нГн (рисунок 5).

	pitch [mm]	Matrix1.L(term1,term1) [mH] Setup1 : LastAdaptive
1	2.4000	0.000213

Рисунок 5. Программные расчеты.

Figure 5. Software calculations.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При моделировании тонкопленочной печатной катушки для УКВ радиоприемника с использованием программы Ansoft Maxwell получен результат, близкий к расчетному.

Однако рассчитать в программе Ansoft Maxwell параметры в динамике не удалось из-за ошибки, решение которой найти планируется в дальнейших работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кульский А.Л. Современные портативные радиоприемники с двойным преобразованием частоты, *Радиоаматор*, 2005, 12, 8–11.
- [2] Озеров И. УКВ приемник. Быть или не быть "кухонному" радио, *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 2002, 4, 24–29.

- [3] Карцан И.Н., Горовой Д.С., Новиков А.С. Направления развития контрольно-измерительных систем, *В сборнике: Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции*, 2020, 330-336.
- [4] Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г., Меланченко Н.Е., Бальсевич А.С. *Конструирование экранов и СВЧ устройств*. М.: Радио и связь, 1990. 353 с.
- [5] Артюхова М.А. Выбор модели эксплуатационной интенсивности отказов интегральных микросхем на основе экспертного анализа опыта эксплуатации, *В сборнике: Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. Вторая Всероссийская научная конференция*, 2021, 211-216.
- [6] Карцан Т.И., Дмитриев Д.Д., Карцан И.Н., Тяпкин В.Н., Самойлов Е.А. Комплексирование ГНСС-приемников и инерциальных датчиков, *Решетневские чтения*, 2015, 1, 232-234.
- [7] Хамидуллина Н.М., Зефиоров И.В., Черников П.С. Анализ одиночных эффектов, создаваемых космическим ионизирующим излучением в интегральных микросхемах радиоэлектронной аппаратуры межпланетных космических аппаратов, *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2021, 4(54), 61-68.
- [8] Сафронов А.Л. Перспективные направления развития электронной компонентной базы, применяемой при производстве средств связи, *В сборнике: Приоритетные направления развития инфокоммуникационных технологий, систем связи и оповещения РСЧС и ГО. Сборник трудов XXX Международной научно-практической конференции*, 2020, 25-30.
- [9] Ефименко А.А., Карлангач П.П. Печатные индуктивные элементы и перспективы их использования, *Современные информационные и электронные технологии*, 2014, 2(15), 52-53.
- [10] Жукова Е.С., Карцан И.Н., Ефремова С.В. Особенности защиты от побочных электромагнитных излучений, *Решетневские чтения*, 2010, 2, 550-552.
- [11] Вавилов В.Е., Ематин Е.А., Тарасов Н.Г. Разработка генератора с плоскими проводниками и вертикальной намоткой, *Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2019, 2(21), 19-25.
- [12] Карцан И.Н., Ефремова С.В., Горовой Д.С. Оптимизация системы управления на базе процедуры TOPSIS, *В книге: Технологии получения и обработки информации о*

динамических объектах и системах. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, 2020, 178-186.

[13] Карцан Р.В., Жукова Е.С., Карцан И.Н. Универсальное программное обеспечение по типу "Каркас", *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2012, 1(8), 356-357.

[14] Гайтов Бх., Автайкин И.Н., Кашин Я.М., Кашин А.Я., Пауков Д.В. Методика расчета трехмерного магнитостатического поля в аксиальных генераторах на базе Ansoft Maxwell, *В книге: Технические и технологические системы. Материалы III международной научной конференции*, 2011, 42-50.

REFERENCES

[1] Kulsy A.L. Modern portable radio receivers with double frequency conversion, *Radioamateur*, 2005, 12, 8-11. (in Russian)

[2] Ozerov I. VHF receiver. To be or not to be "kitchen" radio, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2002, 4, 24-29. (in Russian)

[3] Kartsan I.N., Gorovoy D.S., Novikov A.S. The directions of development of control and measurement systems, *In the collection: Issues of control of economic activity and financial audit, national security, system analysis and management. Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference*, 2020, 330-336. (in Russian)

[4] Chernushenko A.M., Petrov B.V., Maloratsky L.G., Melanchenko N.E., Balsevich A.S. *Designing screens and microwave devices*. Moscow: Radio and Communications, 1990. 353 p. (in Russian)

[5] Artyukhova M.A. Choice of a model of operational failure rate of integrated circuits based on expert analysis of operating experience, *In the collection: Modeling and situational quality management of complex systems. Second All-Russian Scientific Conference*, 2021, 211-216. (in Russian)

[6] Kartsan T.I., Dmitriev D.D., Kartsan I.N., Tyapkin V.N., Samoilov E.A. The Complementation of GNSS Receivers and Inertial Sensors, *Reshetnev Readings*, 2015, 1, 232-234. (in Russian)

[7] Khamidullina N.M., Zefirov I.V., Chernikov P.S. Analysis of Single Effects Created by Space Ionizing Radiation in Integrated Circuits of Radioelectronic Equipment of Interplanetary Spacecraft, *Vestnik NPO S.A. Lavochkin*, 2021, 4(54), 61-68. (in Russian)

[8] Safronov A.L. Prospective directions of development of the electronic component base used in the production of communications, *In the collection: Priority directions of development*

of infocommunication technologies, communications and warning systems of RSChS and civil defense. Proceedings of the XXX International Scientific and Practical Conference, 2020, 25-30. (in Russian)

[9] Efimenko A.A., Karlangach P.P. Printed inductive elements and prospects for their use, *Modern Information and Electronic Technologies*, 2014, 2(15), 52-53. (in Russian)

[10] Zhukova E.S., Kartsan I.N., Efremova S.V. Features of protection from collateral electromagnetic radiation, *Reshetnev Readings*, 2010, 2, 550-552. (in Russian)

[11] Vavilov V.E., Ematin E.A., Tarasov N.G. Development of generator with flat wires and vertical winding, *Youth Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*, 2019, 2(21), 19-25. (in Russian)

[12] Kartsan I.N., Efremova S.V., Gorovoy D.S. Optimization of control system based on TOPSIS procedure, *In book: Technologies of obtaining and processing information about dynamic objects and systems. Collection of abstracts of All-Russian Scientific and Practical Conference, 2020, 178-186. (in Russian)*

[13] Kartsan R.V., Zhukova E.S., Kartsan I.N. Universal software by type "Karkas", *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2012, 1(8), 356-357. (in Russian)

[14] Gaitov B., Avtaykin I.N., Kashin Y.M., Kashin A.Y., Paukov D.V. Method of calculation of three-dimensional magnetic-static field in axial generators based on Ansoft Maxwell, *In book: Technical and technological systems. Proceedings of III International Scientific Conference, 2011, 42-50. (in Russian)*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Карцан Игорь Николаевич, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия
e-mail: kartsan2003@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1833-4036

Igor Nikolaevich Kartsan, doctor of technical sciences, associate professor, senior researcher, Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: kartsan2003@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1833-4036

Цапик Дмитрий Константинович, студент, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия
e-mail: tsapikdk@cfuv.ru

Dmitry Konstantinovich Tsapik, student, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
e-mail: tsapikdk@cfuv.ru

Кузнецов Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург, Россия

Dmitry Gennadyevich Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal State Educational Institution of Higher Education "Admiral Makarov State University of Maritime and

e-mail: KDG779@gmail.com

Inland Shipping" Saint-Petersburg, Russia
e-mail: KDG779@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.06.2022; одобрена после рецензирования 12.07.2022; принята к публикации 09.08.2022.

The article was submitted 24.06.2022; approved after reviewing 12.07.2022; accepted for publication 09.08.2022.