

Научная статья

УДК 629.123

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/21-27>

Оценка точности определения гармонических возмущающих моментов судовых дизелей при использовании упрощённых индикаторных диаграмм

Юрий Алексеевич Лапин[✉], Матвей Валерьевич Грибиниченко, Олеся Сергеевна Портнова

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

✉ lapin.iua@dvfu.ru

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос применимости, получаемых расчётом упрощённых индикаторных диаграмм к расчёту резонансных амплитуд крутильных колебаний в установках с дизелями, имеющими системы ограничения максимального давления сгорания. Кратко описано, каким образом и для каких целей в современных судовых дизелях осуществляется ограничение максимального давления сгорания. Приведены действительная и упрощённая индикаторные диаграммы, а также диаграммы крутящего момента от сил давления газов для современного малооборотного двухтактного дизеля. Приведены результаты гармонического анализа этих диаграмм. Результаты исследования показали, что применение упрощённых индикаторных диаграмм недопустимо при расчёте резонансных амплитуд систем с дизелями, имеющими изменяемые углы впрыска топлива. Также отмечена целесообразность рассмотрения резонансов с 12-го по 24-й порядок при анализе таких установок на крутильные колебания.

Ключевые слова: крутильные колебания, судовые дизельные двигатели, гармонический анализ

Для цитирования: Лапин Ю.А., Грибиниченко М.В., Портнова О.С. Оценка точности определения гармонических возмущающих моментов судовых дизелей при использовании упрощённых индикаторных диаграмм // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 21–27.

Original article

Accuracy evaluation of the marine diesel engines harmonic excitation moments determination by means of the simplified indicator diagrams

Yuriy A. Lapin[✉], Matvey V. Gribinchenko, Olesya S. Portnova

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

✉ lapin.iua@dvfu.ru

Abstract. The article considers the calculated simplified indicator diagrams applicability to the forced torsional vibration calculation in power plants with diesels having systems for limiting the maximum combustion pressure. It is briefly described how and why the maximum combustion pressure is limited in modern marine diesels. The actual and simplified indicator diagrams are given, as well as the diagrams of torque from gas pressure forces for a modern low-speed two-stroke diesel engine. Harmonic analysis results for these diagrams are presented. The study results showed that simplified indicator diagrams using is unacceptable when calculating forced torsional vibration of systems with diesels having variable fuel injection angles. Also, performed work has shown the expediency of considering resonances from 12 to 24 orders when performing torsional vibration analysis for such power plants.

Keywords: torsional vibration, ship diesel engines, harmonic analysis

For citation: Lapin Y.A., Gribinichenko M.V., Portnova O.S. Accuracy evaluation of the marine diesel engines harmonic excitation moments determination by means of the simplified indicator diagrams. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 21–27. (In Russ.).

Введение

При выполнении анализа пропульсивного комплекса судна на крутильные колебания одной из наиболее трудоёмких задач является расчёт резонансной амплитуды крутильных колебаний. Этот расчёт состоит из определения амплитуд возмущающих и демпфирующих моментов. В связи с тем, что в мировом судовом дизелестроении постоянно идёт рост цилиндрических мощностей и параметров рабочего процесса дизелей, задача повышения точности расчёта гармонических возмущающих моментов судовых ДВС является актуальной. При изменении цилиндрической мощности в виде среднего индикаторного давления пропорционально максимальному давлению сгорания величина гармонического возмущающего с приемлемой точностью определяется по формулам и номограммам, представленным в работах отечественных исследователей [1, 2]. В современных судовых высокофорсированных дизелях, среднее эффективное давление которых имеет величину 1,7 МПа и более, часто применяются системы ограничения максимального давления сгорания [3–5, 11]. Это связано с необходимостью поддерживать допустимый уровень механических напряжений в цилиндропоршневой группе с ростом давлений в цилиндрах. Также имеет значение максимальная температура цикла, при которой образуются соединения NOx. Системы ограничения максимального давления имеют различный принцип действия. Наиболее часто применяются следующие методы [3–5, 11]:

- впрыск топлива с запаздыванием;
- парциальный впрыск топлива.

В некоторых случаях на двигателях с электронным управлением используется изменение фактической степени сжатия. Это производится путём изменения времени закрытия выпускного клапана [11].

Величина гармонических возмущающих моментов в двигателях с такими системами отличается от той, которую можно определить при помощи гармонических коэффициентов, представленных в работах [1, 2]. В целях повышения точности расчёта резонансных амплитуд крутильных колебаний систем с такими двигателями целесообразно получить соответствующие гармонические коэффициенты. Для расчёта этих коэффициентов необходимо определить величину возмущающих моментов от сил давления газов. Так как на практике получить индикаторные диаграммы для таких двигателей не всегда возможно, для оценки величины их возмущающих моментов в теории можно применять упрощённые индикаторные диаграммы. Упрощённая индикаторная диаграмма отражает лишь основные параметры цикла, но не учитывает реальную кривизну индикаторной диаграммы в момент впрыска. В связи с этим возникает проблема точности расчёта гармонических возмущающих моментов судовых дизелей таким методом.

Целью настоящей работы является оценка допустимости применения упрощённых индикаторных диаграмм для определения гармонических возмущающих моментов современных судовых дизелей.

Сравнение упрощённой и действительной индикаторных диаграмм

Действительная индикаторная диаграмма представляет собой фактическую зависимость давления в цилиндре от объёма цилиндра или от угла ПКВ (в развёрнутом виде). На ней отражены все тонкости рабочего процесса дизельного двигателя. Упрощённая индикаторная диаграмма отражает только основные показатели рабочего процесса: давление начала сжатия, давление конца сжатия, максимальное давление сгорания, степень предварительного расширения, давление конца расширения. При выполнении тепловых расчётов этого вполне достаточно, чтобы оценить мощность и коэффициент полезного действия цикла. При выполнении динамических расчётов двигателя и разложении этих функций в гармонический ряд может появиться значительное расхождение из-за различий в форме кривых. Отечественными исследователями проводились работы по гармоническому анализу индикаторных диаграмм, в которых наиболее значимыми называются гармоники 1–6-го порядков (для двухтактного дизеля)

[6, 7]. Однако исследование крутильных колебаний судовых главных пропульсивных комплексов показывает, что даже малые значения возмущающих моментов высоких порядков могут вызывать опасные крутильные колебания коленчатых валов по моторным формам, особенно в двигателях без демпферов [1, 2, 8, 9]. Действительная и упрощённая индикаторные диаграммы малооборотного двухтактного дизеля WinGD X62DF на номинальной мощности представлены на рис. 1.

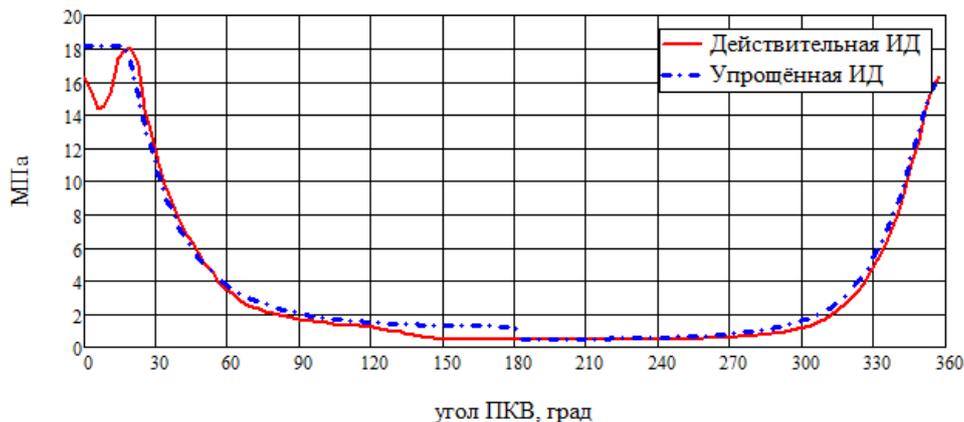


Рис. 1. Действительная и упрощённая индикаторные диаграммы малооборотного двухтактного дизеля по углу ПКВ

Fig. 1. Valid and simplified indicator diagram of a low-speed two-stroke diesel engine referring to crankshaft rotation angle

Построение упрощённой индикаторной диаграммы выполнено с учётом рекомендаций, изложенных в монографии Л.В. Ефремова [8]. При построении использовались известные данные о мощности дизеля, давлении наддува, степени сжатия, максимальном давлении сгорания. Действительная индикаторная диаграмма была получена в процессе ходовых испытаний судна, на котором был установлен данный двигатель. Исследуемый двигатель оснащён электронным блоком управления, и индикаторная диаграмма была получена с программного обеспечения пульта управления главным двигателем.

Построение диаграмм крутящего момента от сил давления газов

Построение диаграммы крутящего момента выполнено по известным формулам динамических расчётов кривошипно-шатунных механизмов (рис. 2) [8,10].

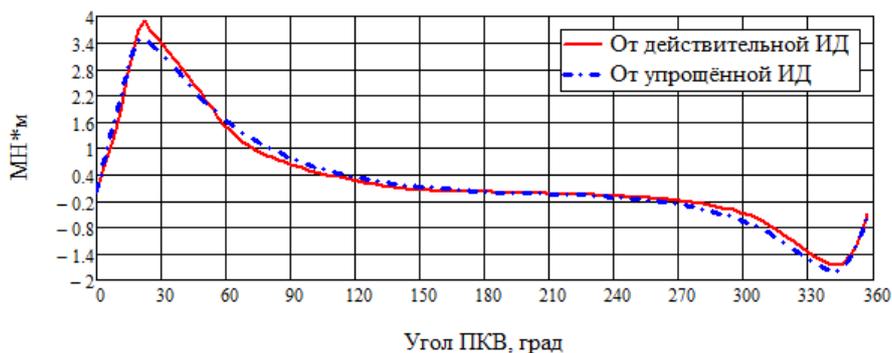


Рис. 2. Диаграммы крутящего момента от сил давления газов малооборотного двухтактного дизеля по углу ПКВ

Fig. 2. Torque from gas pressure forces diagram of a low-speed two-stroke diesel engine referring to crankshaft rotation angle

Гармонический анализ диаграмм крутящего момента

Индикаторные диаграммы были получены в виде таблиц. Диаграммы крутящего момента от сил давления газов также получены в табличной форме. Гармонический анализ диаграммы крутящего момента выполнен при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для этого диапазон по углу ПКВ был разбит на 128 участков. Полученные амплитуды гармонических составляющих показаны на рис. 3.

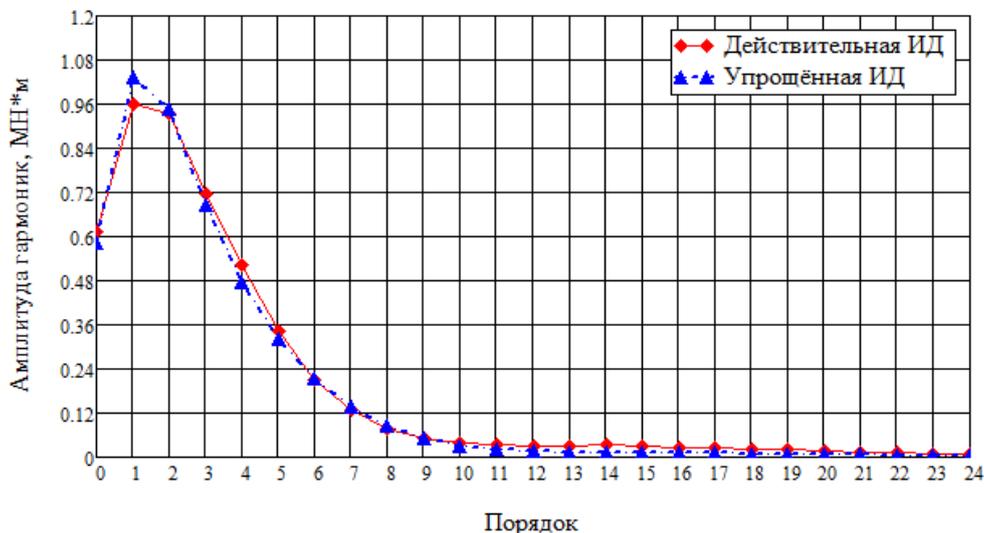


Рис. 3. Амплитуды порядковых гармоник диаграммы крутящего момента от сил давления газов малооборотного двухтактного дизеля

Fig. 3. Amplitudes of ordinal harmonics of the torque diagram from gas pressure forces of a low-speed two-stroke diesel engine

Анализ результатов

Как следует из рис. 3, заметная разница в амплитудах гармоник наблюдается для 1–5-го порядков, а также для 10–20-го порядков. С точки зрения точности расчётов резонансных амплитуд крутильных колебаний наибольший интерес представляет относительное различие между амплитудами этих гармоник.

Для оценки относительного различия было решено представить результаты гармонического анализа при помощи относительного параметра k (рис 4):

$$k_i = \frac{C_i^D}{C_i^{упр}},$$

где C_i^D – амплитуда гармоники i -го порядка диаграммы крутящего момента от сил давления газов, построенной с использованием действительной индикаторной диаграммы;

$C_i^{упр}$ – амплитуда гармоники i -го порядка диаграммы крутящего момента от сил давления газов, построенной с использованием упрощённой индикаторной диаграммы.

На рис.4 видно, что амплитуды гармоник порядков 1–9 отличаются не более чем в 0,9–1,1 раз ($\pm 10\%$). Гармоники порядков 10–24 различаются более значительно (рис. 5). Величина амплитуд гармоник 12–22 порядков, полученных с использованием действительной индикаторной диаграммы, превышает величину амплитуд гармоник, полученных при помощи упрощённой индикаторной диаграммы, более чем в 2 раза. Это существенное различие, которым нельзя пренебрегать при расчётах резонансных амплитуд крутильных колебаний судовых пропульсивных комплексов.

Из рис. 5 следует, что амплитуды порядковых гармоник, полученных с применением действительной индикаторной диаграммы, не уменьшаются с увеличением порядка, как это происходит в случае с дизелями, имеющих классические углы впрыска топлива (именно это отражает упрощённая индикаторная диаграмма). Вместо этого амплитуда порядковых гармоник

растёт с 12-го по 14-й порядок, после чего снижается. В части VII Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС) указано требование о необходимости анализа резонансов крутильных колебаний до 12-го порядка. Учитывая сделанные выше заключения, целесообразно рассматривать резонансы до 24-го порядка, когда в исследуемой системе имеется двигатель, обеспечивающий поддержание максимального давления сгорания путём изменения углов впрыска топлива.

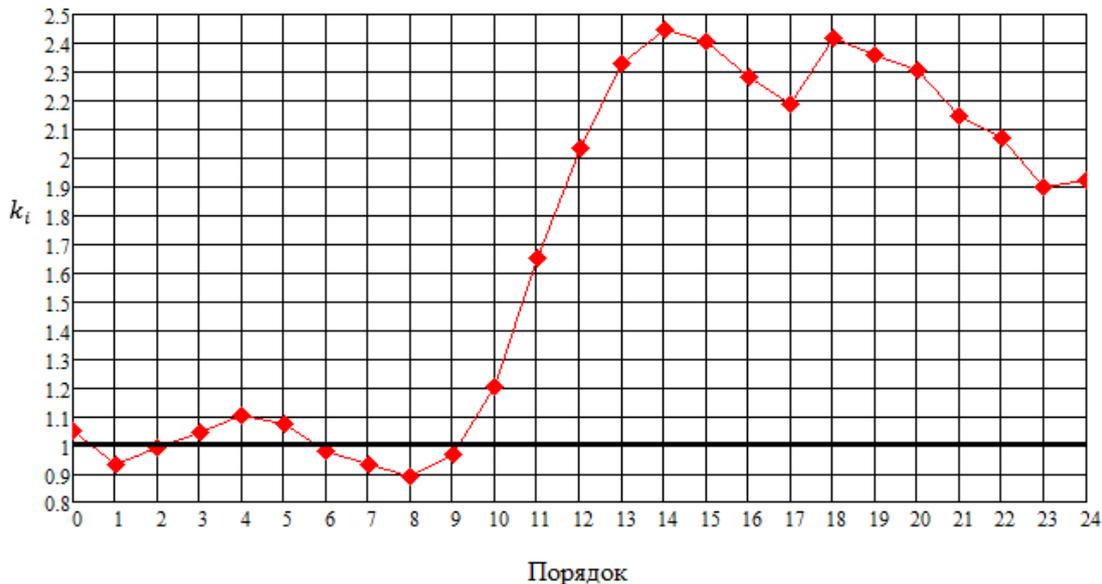


Рис. 4. Величина параметра k
Fig. 4. Value of parameter k

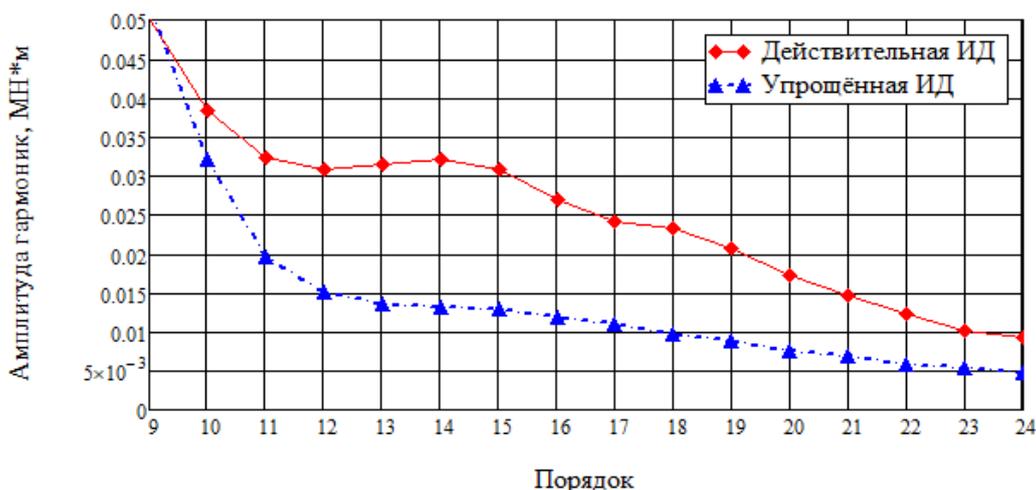


Рис. 5. Амплитуды гармоник порядков 10-24
Fig. 5. Harmonics amplitudes of orders 10-24

Заключение

Оценка допустимости применения упрощённых индикаторных диаграмм для определения гармонических возмущающих моментов современных судовых дизелей показала следующее.

1. Во многих современных судовых дизелях существует фактор, снижающий точность расчёта возмущающих моментов с использованием упрощённых индикаторных диаграмм. Он заключается в том, что дизели могут оснащаться системами поддержания максимального давления сгорания во избежание его превышения. Это приводит к усложнению формы кривой индикаторной диаграммы двигателя.

2. Для дизелей, оснащённых такими системами, точность расчёта гармонических возмущающих моментов с использованием упрощённых индикаторных диаграмм является неудовлетворительной.

3. Фактическая величина порядковых гармоник может превышать расчётную, полученную при использовании упрощённой индикаторной диаграммы, более чем в 2 раза. Таким расхождением нельзя пренебрегать при проведении расчётов резонансных амплитуд крутильных колебаний.

4. Выявлено, что при анализе на крутильные колебания пропульсивных комплексов, в состав которых входят дизели, имеющие системы ограничения максимального давления, следует учитывать резонансы до 24-го порядка, а не до 12-го, как требуют Правила РМРС.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Лапин Ю.А – теоретическая проработка и анализ результатов; Грибиниченко М.В. – постановка цели исследования; Портнова О.С. – сбор данных, анализ результатов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors confirm contribution to the paper as follows: Yu. Lapin – theoretical study, results analysis; M. Gribinichenko – setting the research aim; O. Portnova – data collection. Results analysis. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Терских В.П. Крутильные колебания валопровода силовых установок: Исследования и методы расчета. В 4 т. Ленинград: Судостроение, 1969–1970.
2. Истомина П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС. Ленинград: Судостроение, 1968. 305 с.
3. Возницкий И.В. Современные малооборотные двухтактные двигатели. Москва: Моркнига, 2007. 122 с.
4. Возницкий И.В. Современные судовые среднеоборотные двигатели. Москва: Моркнига, 2006. 140 с.
5. Возницкий И.В. Топливная аппаратура судовых дизелей – конструкция, проверка состояния, регулировка. Москва: Моркнига, 2007. 128 с.
6. Самойленко А.Ю. Альтернативный эталонный цикл двигателя внутреннего сгорания // Наука и образование. 2012. № 8. С. 479-490. EDN: PMBBNH
7. Самойленко А.Ю. Частотная модель индикаторной диаграммы судового двухтактного дизеля // Журнал университета водных коммуникаций. 2012. № 3. С. 59–63. EDN: PCREGZ
8. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий. Санкт-Петербург: Наука, 2007. 276 с.
9. Сибряев К.О. Анализ развития крутильных колебаний в машинно-двигательном комплексе судов проекта 1570 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2009. № 2. С. 185–187. EDN: KWDEPP
10. Сегаль В.Ф. Динамические расчёты двигателей внутреннего сгорания. Ленинград: Машиностроение, 1974. 247 с.
11. Malcolm L. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th edition. Oxford.: Elsevier publisher house, 2021. 957 p.

REFERENCES

1. Terskih V.P. Power plant shatline torsional vibration: Researches and calculation methods: in 4 vols. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969–1970. (In Russ.).
2. Istomin P.A. Marine internal combustion engines torsional vibration. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1968. 305 p. (In Russ.).
3. Voznitsky I.V. Modern low speed two-stroke engines. Moscow, Morkniga Publ., 2007. 122 p. (In Russ.).
4. Voznitsky I.V. Marine modern four-stroke engines. Moscow, Morkniga Publ., 2006. 140 p. (In Russ.).

5. Voznitsky I.V. Marine diesel engines fuel injection equipment – the construction, diagnostics, regulating. Moscow, Morkniga Publ., 2007. 128 p. (In Russ.).
6. Samojlenko A.Yu. Alternative ideal cycle of internal-combustion engine. *Science and education*, 2012, no. 8, pp. 479–490. (In Russ.).
7. Samojlenko A.Yu. Frequency model of indicator diagram of the ship's two-stroke diesel engine. *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij*, 2012, no. 3, pp. 59–63. (In Russ.).
8. Efremov L.V. Computerized analyses of torsional vibrations in propulsion units: theory and practice. Saint Petersburg, Nauka Publ, 2007. 276 p. (In Russ.).
9. Sibryaev K.O. Analysis of the development of torsional vibrations in the propulsion unit of the ships design 1570. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*, 2009, no. 2, pp. 185–187.
10. Segal' V.F. Internal combustion engines dynamics calculations. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1974. 247 p. (In Russ.).
11. Malcolm L. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. 10th ed. Oxford, Elsevier publisher house, 2021. 957 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лапин Юрий Алексеевич – аспирант, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, lapin.iaa@dvfu.ru, SPIN-код: 2511-6398

Yuriy A. Lapin, Postgraduate student, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, lapin.iaa@dvfu.ru

Грибиниченко Матвей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, директор Отделения машиностроения морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, gribinichenko.mv@dvfu.ru, SPIN-код: 8038-4960

Matvey V. Gribinichenko, Associate Professor, Head of Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport of the Engineering Department, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, gribinichenko.mv@dvfu.ru

Портнова Олеся Сергеевна – кандидат технических наук, доцент Отделения машиностроения морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, gribinichenko.mv@dvfu.ru, SPIN-код: 7989-1406

Olesya S. Portnova, Associate Professor of Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport of the Engineering Department, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, portnova.os@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию / Received: 15.02.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 04.03.2024.

Принята к публикации / Accepted: 10.06.2024.