

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.01:004

doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-3-9

Динамический расчет тандемного ротора гребных электродвигателей

П.П. Гайджуров¹, Г.К. Птах²¹ Донской государственный технический университет² ООО «НПП «Мир»

Dynamic Calculation of Electric Propulsion Motor Tandem Rotors

P.P. Gaydzhurov¹, G.K. Ptakh²¹ Don State Technical University² LLC "SPE "Mir"

Приведены результаты моделирования динамического отклика тандемного ротора гребных электродвигателей судна ледового класса при экстремальных режимах эксплуатации. В качестве внешнего нестационарного воздействия рассмотрено нагружение роторов крутящими моментами в сочетании с вибрацией, передаваемой через опоры на электродвигатели. На базе программного комплекса ANSYS Mechanical разработана методика построения трехмерной конечно-элементной модели исследуемой конструкции путем фрагментарной сборки. Представлена схема упругоподатливых 3D-связей, позволяющая моделировать возвратно-вращательные колебания тандемного ротора. На тестовом примере выполнена верификация предлагаемой механико-математической модели крутильной системы. На основании расчетных данных проведен анализ динамических параметров тандемного ротора для самых неблагоприятных сценариев эксплуатации.

Ключевые слова: гребной электродвигатель, судно ледового класса, крутильные колебания, конечно-элементная модель, модальный анализ, интегрирование уравнения движения

The article presents the results of modeling the dynamic response of the tandem rotors of ice-class vessel electric propulsion motors under extreme operating conditions. The loading of rotors by torques in combination with vibration transmitted through the supports to the electric motors is considered as an external non-stationary action. A method for constructing a three-dimensional finite element model of the structure under study by fragmentary assembly has been developed on the basis of the ANSYS Mechanical software package. A scheme of elastic-compliant 3D-links allowing simulating the reciprocating-rotational vibrations of a tandem of rotors is presented. A test example is used to verify the proposed mechanical-mathematical model of the torsion system. Based on the calculated data, the analysis of the dynamic parameters of the tandem rotors is performed for the most unfavorable operating scenarios.

Keywords: electric propulsion motor, ice-class vessel, torsional vibrations, finite element model, modal analysis, integration of the equation of motion

Оценка динамических параметров ротора с учетом пиковых эксплуатационных нагрузок в сочетании с вибрацией, передаваемой на вал гребного электродвигателя (ГЭД) судна ледового класса через опоры, относится к основным задачам, решаемым при проектировании ГЭД. Пиковые нагрузки, как правило, соответствуют режимам плавания в сложных ледовых условиях, в частности, режимам кратковременного заклинивания гребного винта и фрезерования льда [1, 2].

С учетом современных тенденций развития ледокольного флота Российской Федерации к прочности и надежности ГЭД предъявляются следующие требования [3, 4]:

- система электродвижения судна ледового класса должна выдерживать перегрузки по крутящему моменту T :

- в режиме фрезерования льда $T_{\text{ном}} < T < 1,6T_{\text{ном}}$ при частоте вращения вала $0,4n_{\text{ном}} < n < 0,6n_{\text{ном}}$ не более 30 с, где $T_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ — крутящий момент и частота вращения валов номинальном режиме;

- в режиме заклинивания гребного винта $T_{\text{ном}} < T < 1,8T_{\text{ном}}$ при частоте вращения вала $0 < n < 0,4n_{\text{ном}}$ не более 10 с;

- вал ГЭД должен работать при взаимодействии гребного винта со льдом исходя из увеличения момента сопротивления до $2,5T_{\text{ном}}$ в течение 0,5 с; механическая прочность должна быть обеспечена при набросе крутящего момента за 0,05 с;

- в расчетах динамических параметров ГЭД при моделировании переходных процессов, соответствующих взаимодействию гребного винта со льдом, необходимо учитывать крутильные колебания механической системы гребной винт — гребной вал — ГЭД;

- ГЭД должен надежно работать при вибрационных колебаниях с частотой 2,0...13,2 Гц и амплитудой перемещения ± 1 мм и с частотой 13,2...80,0 Гц и ускорением 0,7g, а также при ударах с ускорением 5g и частотой 40...80 уд/мин.

Инженерная методика динамического расчета судового валопровода [5, 6] основана на упрощенной расчетной схеме, получаемой путем приведения подвижных масс к некоторой оси эквивалентной механической системы. Очевидно, что определяемые при таком подходе амплитудно-частотные характеристики можно рассматривать лишь в качестве первого приближения.

Цель работы — получение более точных данных о динамических параметрах проектируемого валопровода с использованием трехмерного конечно-элементного моделирования. Настоящая статья является в известной степени продолжением исследований, описанных в трудах [7, 8].

Рассмотрен тандемный ротор ГЭД (далее ТР), содержащий два жестко соединенных ротора, каждый из которых имеет полый двухопорный вал и два пакета. В состав последних входят два массивных венца (магнитопровода), четыре опорных диска с восемью спицами каждый и каркас из радиальных перфорированных ребер жесткости. Наружные диаметры хвостовых участков носового и кормового валов имеют разные значения. Габаритные размеры одного ротора: 6870×3588 мм. Масса ТР составляет 196 т.

Расчетная схема ТР показана на рис. 1, где a , b , c , d , e — исследуемые точки, расположенные в плоскости YOZ .

При создании конечно-элементной модели ТР использована технология автоматической фрагментарной сборки, суть которой состоит в предварительном построении моделей отдельных элементов ГЭД с их последующей архивацией. Визуализация фрагментарной сборки твердотельной модели ТР приведена на рис. 2.

Анализ динамического отклика ТР при изменении крутящего момента выполнен в соответствии с кусочно-ломанной функцией $T(t)$, график которой показан на рис. 3. Такой вид переходного процесса характерен для экстремального режима эксплуатации. Переходный

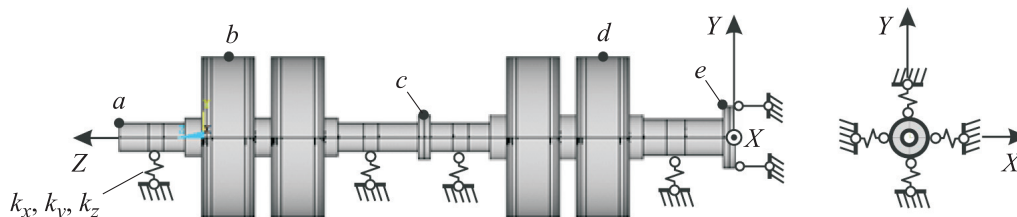


Рис. 1. Расчетная схема ТР

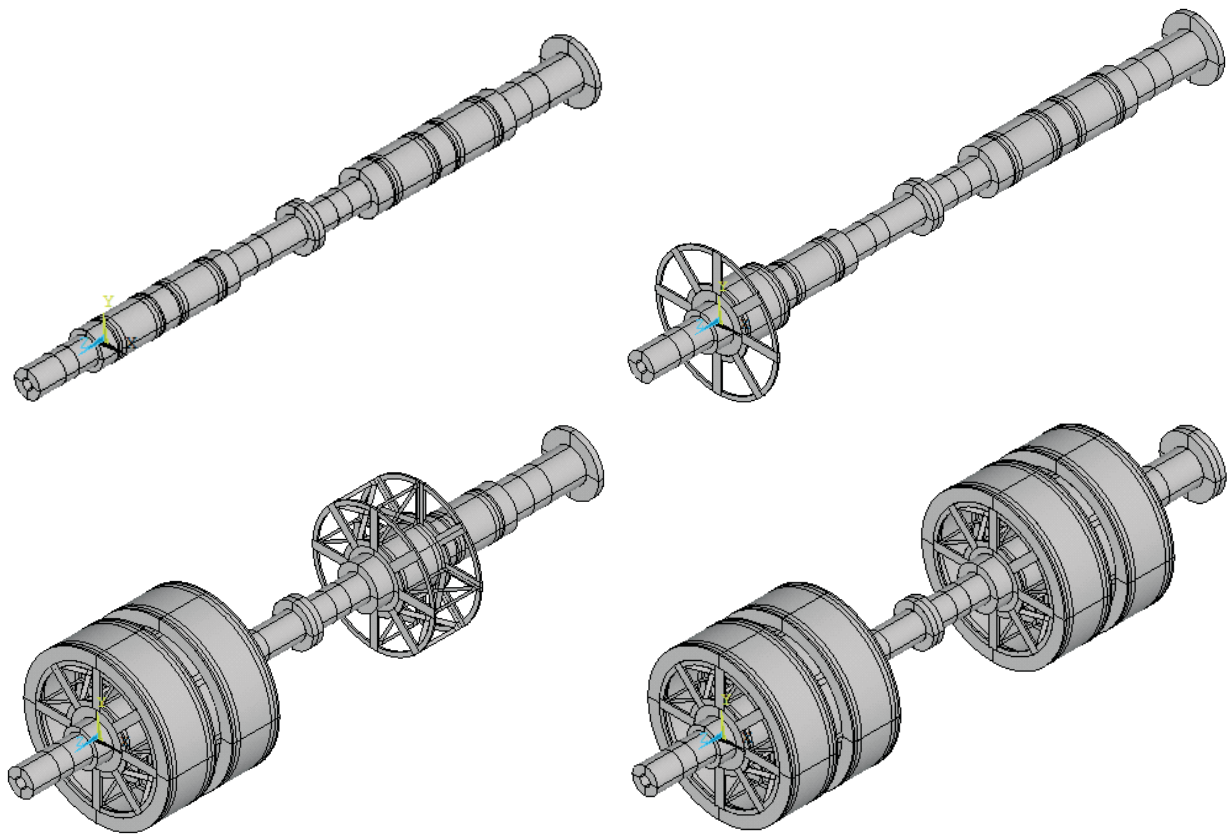


Рис. 2. Визуализация фрагментарной сборки твердотельной модели ТР

процесс ТР смоделирован с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical [9–11].

Конечно-элементная модель ТР, включающая в себя объемные и пластинчатые конечные элементы, приведена на рис. 4. Для моделирования крутильных колебаний ТР в местах расположения опор скольжения введены 3D-пружинные опоры с коэффициентами жесткости k_x , k_y , k_z (см. рис. 1). На торце кормового фланца предусмотрены связи, запрещающие смещение модели вдоль оси Z.

При разбивке деталей ГЭД на конечные элементы применены регулярные сетки, что, как известно, повышает точность расчетов по сравнению с таковой при smart-генерации сетки. Нагружение ТР в момент времени t_i выполнялось по следующей схеме: крутящие моменты $T(t_i)$ прикладывались к внешним поверхностям четырех магнитопроводов, а момент сопротивления $T_c(t_i) = 4T(t_i)$, действующий в противоположном направлении, — к фланцу отбора мощности.

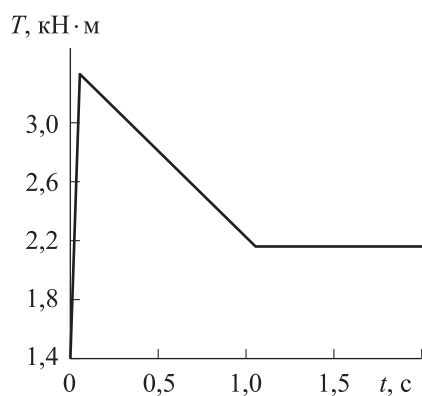


Рис. 3. График переходного процесса ТР

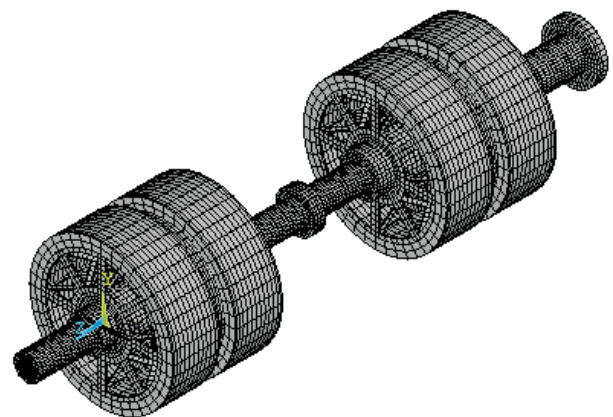


Рис. 4. Конечно-элементная модель ТР

В общем виде уравнение движения пространственной изгибно-крутильной механической системы в конечно-элементной формулировке имеет вид [12]

$$[M]\{W''(t)\} + [C]\{W'(t)\} + [K]\{W(t)\} = \{G\} + \{T(t)\},$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ — матрица масс, демпфирования и жесткости ансамбля конечных элементов соответственно; $\{W''(t)\}$, $\{W'(t)\}$ и $\{W(t)\}$ — вектор-столбец узловых ускорений, скоростей и перемещений соответственно; $\{G\}$ и $\{T(t)\}$ — вектор-столбец статических (собст-

венный вес) и динамических (моменты) нагрузок; t — временная координата.

Для численного интегрирования уравнения движения использован метод Ньюмарка [13]. При этом шаг интегрирования по временной оси Δt назначался так, чтобы с достаточной точностью учесть вклады физически значимых собственных пар.

Исследование точности (верификация) численного интегрирования уравнения движения выполнено на тестовом примере, представляющем собой задачу о закручивании соизмеримого с ротором ГЭД полого стального двухопорного вала моментами $T(t)$.

Графики крутильных колебаний ТР в виде временных зависимостей угловых перемещений ТР φ_b , φ_d , φ_a , φ_c , φ_e в соответствующих точках b , d , a , c , e (см. рис. 1), полученные при шаге $\Delta t = 0,01$ с, приведены на рис. 5. Вычисление углового перемещения в момент времени t осуществлялось по формуле $\varphi(t) = w_x(t)/y$, где $w_x(t)$ — перемещение исследуемой точки вдоль оси x ; y — координата исследуемой точки.

Из рис. 5 следует, что пакеты роторов первого и второго ГЭД совершают крутильные колебания с одинаковой частотой, но в противофазе. Отметим, что такой вид колебательного процесса соответствует второй собственной форме (которая в статье не приведена).

Таким образом, при заданном динамическом воздействии узел крутильных колебаний расположен в зоне, прилегающей к фланцевому соединению валов. «Дрейф» на графиках $\varphi_a(t)$, $\varphi_b(t)$, $\varphi_c(t)$ объясняется особенностями введенных упругих 3D-связей, позволяющих совершать валу возвратно-вращательные перемещения как жесткому целому.

Распределение амплитудных значений интенсивности напряжений σ_i в ТР (рис. 6), подтверждает наличие «узла» колебаний в месте фланцевого соединения его валов. При заданном нагружении максимальное значение интенсивности напряжения $\sigma_{i \max} = 256$ МПа, что в 3,4 раза меньше предела текучести материала вала ($\sigma_T = 863$ МПа).

Вибрационное воздействие на ТР смоделировано путем задания нестационарного смещения опор, изменяющегося вдоль оси Y по гармоническому закону $w_y(t) = A \sin \theta t$, где A — амплитуда колебаний; θ — круговая частота колебаний. Распределение амплитудных значений интенсивности напряжений σ_i в валах ТР

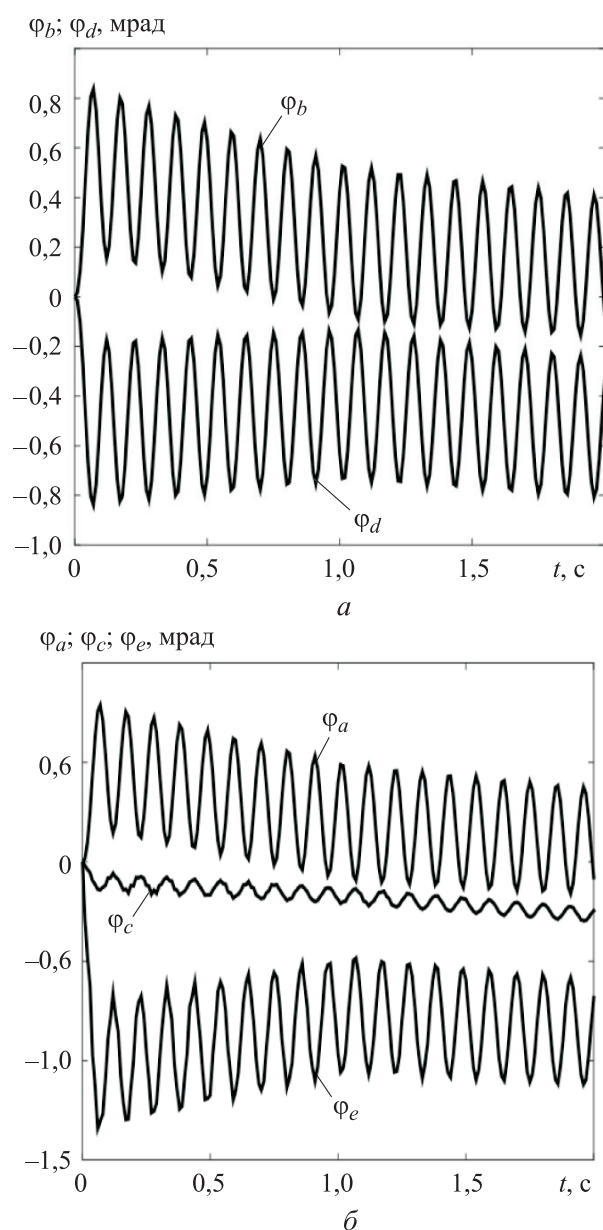


Рис. 5. Зависимости угловых перемещений ТР φ_b , φ_d в точках b , d (а) и φ_a , φ_c , φ_e в точках a , c , e (б) от времени t

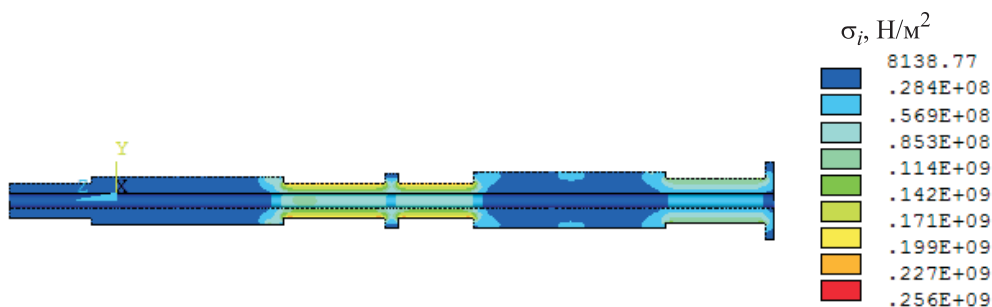


Рис. 6. Распределение амплитудных значений интенсивности напряжений σ_i в ТР при кручении вала

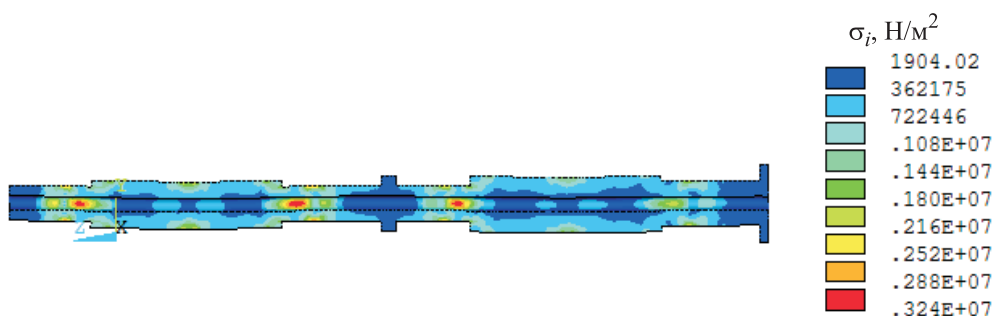


Рис. 7. Распределение амплитудных значений интенсивности напряжений σ_i в валах ТР при вибрации

при вибрационных колебаниях с круговой частотой $\theta = 82,9 \text{ c}^{-1}$ (13,2 Гц) и амплитудой $A = 1 \text{ мм}$ показаны на рис. 7.

Как видно из рис. 7, максимальное значение интенсивности напряжения $\sigma_{i \max} = 3,24 \text{ МПа}$. Таким образом, напряжения ТР от вибрации пренебрежительно малы по сравнению с таковыми от крутильных колебаний. Вместе с тем зоны, в которых возникают максимальные напряжения от кручения, совпадают с областями концентрации напряжений, обусловленных вибрацией.

Выводы

1. На основании конечно-элементного моделирования установлено, что при экстремаль-

ном режиме эксплуатации ТР максимальное значение интенсивности напряжений составляет 256 МПа, что в 3,4 раза меньше предела текучести материала вала. Этот запас прочности достаточен для длительной и надежной эксплуатации ГЭД.

2. Анализ графиков крутильных колебаний ТР показал, что амплитудное значение его углового перемещения при набросе крутящего момента не превышает $0,8^\circ$. Этот кинематический параметр указывает на достаточную жесткость разработанной конструкции.

3. Показано, что вклад в напряженное состояние ТР при вибрационных колебаниях с круговой частотой 13,2 Гц и амплитудой 1 мм не превышает 1,3 %.

Литература

- [1] Хайкин А.Б. *Современные и перспективные электроходы*. Ленинград, Судостроение, 1969. 400 с.
- [2] Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. *Проектирование ледоколов*. Санкт-Петербург, Судостроение, 2013. 512 с.
- [3] Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В. и др. *Ледоколы*. Ленинград, Судостроение, 1972. 286 с.
- [4] Быков А.С., Башаев В.В., Малышев В.А. и др. *Гребные электрические установки атомных ледоколов*. Санкт-Петербург, Элмор, 2004. 320 с.
- [5] Терских В.П. *Крутильные колебания валопроводов силовых установок*. Ленинград, Судостроение, 1971. 307 с.

- [6] Ефремов Л.В. *Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий*. Санкт-Петербург, Наука, 2007. 276 с.
- [7] Высоковский Д.А., Гайджуков П.П., Птах Г.К. Анализ динамического отклика гребной электроустановки судна ледового класса при экстремальных режимах эксплуатации. *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*, 2019, № 3, с. 21–27, doi: <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2019-3-21-27>
- [8] Гайджуков П.П., Птах Г.К. Анализ динамического воздействия на пакет статора гребного электродвигателя судна ледового класса при бортовой и килевой качке. *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*, 2020, № 4, с. 5–12, doi: <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-4-5-12>
- [9] Басов К.А. *ANSYS: справочник пользователя*. Москва, ДМК Пресс, 2005. 640 с.
- [10] Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалик А.Ф. *ANSYS для инженеров*. Москва, Машиностроение, 2004. 512 с.
- [11] Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. *ANSYS в руках инженеров. Механика разрушения*. Москва, Ленанд, 2018. 456 с.
- [12] Решение задач динамики в ANSYS. Краткое руководство пользователя. URL: <https://ru.convdocs.org/docs/index-3373.html> (дата обращения: 15.05.2021).
- [13] Бате К., Вилсон Е. *Численные методы анализа и метод конечных элементов*. Москва, Стройиздат, 1982. 448 с.

References

- [1] Khaykin A.B. *Sovremennyye i perspektivnyye elektrokholody* [Modern and prospective technologies]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969. 400 p. (In Russ.).
- [2] Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. *Proektirovanie ledokolov* [Design of icebreakers]. Sankt-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2013. 512 p. (In Russ.).
- [3] Kashtelyan V.I., Ryvlin A.Ya., Faddeev O.V., et al. *Ledokoly* [Icebreakers]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1972. 286 p. (In Russ.).
- [4] Bykov A.S., Bashaev V.V., Malyshev V.A., et al. *Grebnyye elektricheskiye ustanovki atomnykh ledokolov* [Electric propulsion installations of atomic icebreakers]. Sankt-Petersburg, Elmor Publ., 2004. 320 p. (In Russ.).
- [5] Terskikh V.P. *Krutil'nyye kolebaniya valoprovodov silovykh ustanovok* [Torsion oscillations of power plant shaft lines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1971. 307 p. (In Russ.).
- [6] Efremov L.V. *Teoriya i praktika issledovaniy krutil'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologiy* [Theory and practice of study on power plant torsion oscillations using computer technologies]. Sankt-Petersburg, Nauka Publ., 2007. 276 p. (In Russ.).
- [7] Vysokovskiy D.A., Gaydzhurov P.P., Ptakh G.K. Dynamic behavior analysis of the electric propulsion system of the ice class ships under extreme operating conditions. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2019, no. 3, pp. 21–27, doi: <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2019-3-21-27> (in Russ.).
- [8] Gaydzhurov P.P., Ptakh G.K. Analysis of the dynamic effect on the stator package rowing electric motor of an ice class vessel when the side and keel pitching. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2020, no. 4, pp. 5–12, doi: <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-4-5-12> (in Russ.).
- [9] Basov K.A. *ANSYS: spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS: user's guide]. Moscow, DMK Press Publ., 2005. 640 p. (In Russ.).
- [10] Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalik A.F. *ANSYS dlya inzhenerov* [ANSYS for engineers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 512 p. (In Russ.).
- [11] Morozov E.M., Muyszemnek A.Yu., Shadskiy A.S. *ANSYS v rukakh inzhenerov. Mekhanika razrusheniya* [ANSYS in hands of engineers. Destruction mechanics]. Moscow, Lenand Publ., 2018. 456 p. (In Russ.).
- [12] *Reshenie zadach dinamiki v ANSYS. Kratkoe rukovodstvo pol'zovatelya* [Solving dynamics problems with ANSYS. Short user's guide]. URL: <https://ru.convdocs.org/docs/index-3373.html> (accessed: 15.05.2021). (In Russ.).

- [13] Bathe K.J., Wilson E.L. *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall, 1976. 528 p. (Russ. ed.: Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 448 p.)

Статья поступила в редакцию 03.07.2021

Информация об авторах

ГАЙДЖУРОВ Петр Павлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика». Донской государственный технический университет (344003, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Гагарина, д. 1, e-mail: gpp-161@yandex.ru).

ПТАХ Геннадий Константинович — доктор технических наук, профессор, главный конструктор. ООО «НПП «Мир» (346400, Ростовская обл., Новочеркасск, Российская Федерация, ул. Просвещения, д. 155а, офис 25, e-mail: ptah2003@list.ru).

Information about the authors

GAIDZHUROV Petr Pavlovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technical Mechanics. Don State Technical University (344003, Rostov-on-Don, Russian Federation, Gagarin Sq., Bldg. 1, e-mail: gpp-161@yandex.ru).

PTAKH Gennady Konstantinovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Chief Designer. LLC “SPE “Mir” (346400, Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation, Prosveshcheniya Str., Bldg. 155a, office 25, e-mail: ptah2003@list.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гайджуров П.П., Птах Г.К. Динамический расчет тандемного ротора гребных электродвигателей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 3–9, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-3-9

Please cite this article in English as:

Gaydzhurov P.P., Ptakh G.K. Dynamic Calculation of Electric Propulsion Motor Tandem Rotors. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 1, pp. 3–9, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-3-9



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ»

Авторы: Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Предназначено для самостоятельного изучения студентами специалитета пятого модуля дисциплины «Физика». Рассмотрены квантовые свойства излучения и волновые свойства микрочастиц. С помощью уравнения Шредингера решены стационарные задачи квантовой механики. Приведены ядерная модель атома Резерфорда, постулаты Бора.

В конце каждого раздела даны решения тематических задач и задания для самоконтроля.

Для студентов специалитета, изучающих дисциплину «Физика».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>