

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591

EDN SZETGC

TO THE PROBLEM OF REDUCING THE AMOUNT OF EXCHANGE ELECTRIC POWER FLOWS BETWEEN PARALLEL-OPERATING DIESEL GENERATORS OF ALTERNATING CURRENT

A. N. Sobolenko¹, G. B. Gorelik¹, A. Yu. Chistyakov²

¹ Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok Russian Federation,

² State Marine Technical University,
Saint-Petersburg, Russian Federation

The problems associated with mutual flows of electric energy between several alternating current diesel generators during their parallel operation are considered. It is noted that of electrical energy in some cases leads to emergency situations, reduces the efficiency of operation of units and their reliability. Fluctuations in operating parameters cause voltage pulsations, reduce unit efficiency, limit the use of full power, have a negative psychophysiological effect on personnel, and lead to increased wear of rotation speed controllers units. At the same time, if we present the phenomena occurring in the system of parallel diesel generators in a simplified manner, we can provide a scientific understanding of the essence of the processes and develop practical recommendations for ensuring the quality of the energy generated. A mathematical model of two parallel diesel generators is presented, from which it follows that the exchange oscillations are of a single-node form, the node of which is located in the middle of a conditional flexible shaft in the form of an electrical connection connecting the diesel generators. With a significant swing in the amplitude of oscillations, their frequency in various load modes is 2 to 5 Hz. It is close to the frequency of the disturbing forces caused by the working processes in the diesel engine. In a simplified torsion system for parallel operation of a group of diesel generators on a powerful electric network, each unit should be considered as a single-mass torsion system. The natural frequency of a single-node oscillation form has one node in the zone of conditional electrical connection between generators. Resonance oscillations in the system arise due to an unstable working process as a result of unstable operation of the fuel equipment from cycle to cycle. This leads to an increased flow of electrical energy between parallel diesel generators. This phenomenon is usually accompanied by a decrease in the efficiency of the installation as a whole.

Keywords: electrical power flows, exchange oscillations, oscillation amplitude, torsion circuit, resonant oscillations, alternative current, voltage pulsations, operation safety.

For citation:

Sobolenko, A. N., G. B. Gorelik and A. Yu. Chistyakov "To the problem of reducing the amount of exchange electric power flows between parallel-operating diesel generators of alternating current." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 584–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591.

УДК 621.436.03 (031)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОБМЕННЫХ ПЕРЕТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. Н. Соболенко¹, Г. Б. Горелик¹, А. Ю. Чистяков²

¹ Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия,

² Санкт-Петербургский Морской технический университет
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы, связанные с взаимными перетеканиями электрической энергии между несколькими дизель-генераторов переменного тока при их параллельной работе. Отмечается, что амплитуда электроэнергии в ряде случаев приводит к аварийным ситуациям, снижает эффективность эксплуатации агрегатов и их надежность. Колебания режимных параметров вызывают пульсацию напряжения, снижают коэффициент полезного действия агрегатов, ограничивают использование полной мощности, оказывают отрицательное психофизиологическое воздействие на персонал, приводят к повышенному износу агрегатов. Понимание сути происходящих процессов и физической природы обменных колебаний позволяют принимать соответствующие технические решения, выполнять опытно-конструкторские разработки и обеспечивать безопасность эксплуатации дизель-электрических агрегатов при их параллельной работе. Из представленной математической модели двух параллельно работающих дизель-генераторов следует, что обменные колебания, узел которых находится посередине условного податливого вала в виде электрической связи, соединяющей ДГ, имеют одноузловую форму. Обращается внимание на то, что при значительном размахе амплитуды колебаний их частота на различных режимах нагрузки близка к частоте возмущающих сил, вызванных рабочими процессами в дизеле. Отмечается, что в упрощенной крутильной системе для параллельной работы группы ДГ на мощную электрическую сеть следует рассматривать каждый агрегат в качестве одномассовой крутильной системы. Сделан вывод о том, что собственная частота одноузловой формы колебаний имеет один узел в зоне условной электрической связи между генераторами. Рассмотрены резонансные колебания в системе, возникающие из-за неустойчивости рабочего процесса вследствие нестабильной работы топливной аппаратуры от цикла к циклу, которые приводят к повышенному перетеканию электрической энергии между параллельно работающими дизель-генераторами. Это явление сопровождается, как правило, снижением эффективности установки в целом.

Ключевые слова: перетоки электрической энергии, обменные колебания, крутильная схема, резонансные колебания, переменный ток, пульсации напряжения, безопасность эксплуатации.

Для цитирования:

Соболенко А. Н. Исследование проблемы снижения величины обменных перетоков электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами переменного тока / А. Н. Соболенко, Г. Б. Горелик, А. Ю. Чистяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 584–591. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-584-591. — EDN SZETGC.

Введение (Introduction)

Проблеме статической устойчивости второго рода в энергетике посвящено много исследований в первую очередь в отечественной литературе. Были предложены различные пути ее решения [1–4]. В соответствии с терминологией международной организации энергетиков (СИГРЭ) проблема получила наименование «колебания». При этом понимают способность дизель-генераторов (ДГ), включенных параллельно, работать без самораскачивания после малого возмущения, т. е. *устойчивость системы в малом*. Колебания в системе, обуславливаемые неустойчивостью 2-го рода, из-за наличия нелинейности, имеют конечную амплитуду и, как правило, не приводят к выпадению дизель-генератора из синхронизма, что схоже с колебаниями от действия вынуждающих сил. В результате имеет место неустойчивая работа, при которой электрические и механические величины самопроизвольно колеблются около положения равновесия. Колебания режимных параметров приводят к ряду отрицательных последствий. В частности, обменные колебания мощности между параллельно работающими агрегатами приводят к повышенному износу регуляторов частоты вращения. Вызывая пульсацию напряжения, они затрудняют работу систем автоматизации, снижают КПД агрегатов, оказывают отрицательное психофизиологическое воздействие на обслуживающий персонал, а иногда даже исключают возможность параллельной работы.

В настоящее время отмечается существенное сокращение количества исследований по данной проблеме, но сам вопрос по-прежнему остается нерешенным, поскольку практика эксплуатации связана с вопросами обеспечения качества работы параллельной работы ДГ переменного тока¹. Следует также отметить, что при этом большая часть дизель-генераторов по-прежнему остается иностранного производства.

¹ ISO 8528–1:2005 «Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets. Part 1: Application, ratings and performance»).

Цель работы — представить аспекты параллельной работы дизель-генераторов и определить возможные крутильные схемы для различных случаев, показать подходы к определению параметров крутильной системы на основе экспериментального исследования, сформировать математическую модель для характерного случая эксплуатации и представить решение.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Физическая природа обменных колебаний при параллельной работе. Вполне очевидна зависимость величины обменных колебаний электрической мощности от моментов инерции вращающихся масс и частоты вращения, т. е. от условий, связанных с достижением резонанса между собственными колебаниями системы работающих параллельно агрегатов и источником возмущающих сил. Как следует из работ автора [5, 6], для двух параллельно работающих дизель-генераторов крутильную схему системы можно представить в виде *многомассовой крутильной системы* (рис. 1).

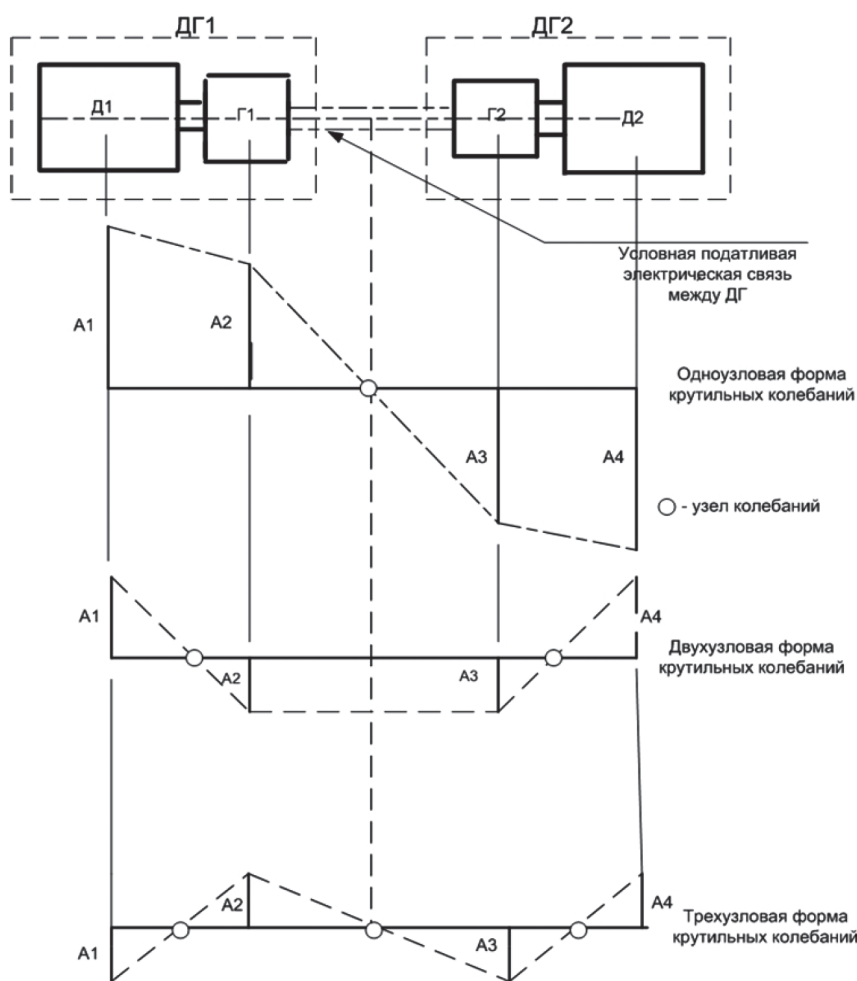


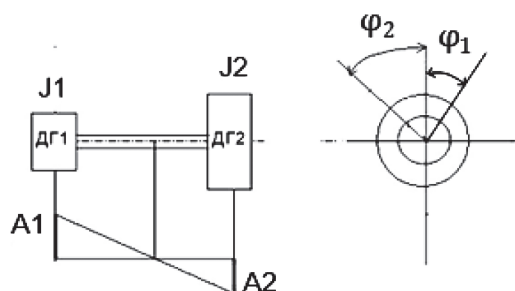
Рис. 1. Схема четырехмассовой крутильной системы из двух параллельно работающих дизель-генераторов
Условные обозначения:

A1–A4 — условные амплитуды крутильных колебаний различных форм;
кружками показаны узлы крутильных колебаний различных форм

Наибольший интерес представляют обменные колебания одноузловой формы, узел которых находится посередине условного податливого вала в виде электрической связи, соединяющей ДГ. При значительном размахе амплитуды колебаний их частота на различных режимах нагрузки, которая составляет 2–5 Гц, близка к частоте возмущающих сил, вызванных рабочими процессами в дизеле.

Упрощенная крутильная система приведена на рис. 2. Для параллельной работы группы дизель-генераторов с мощной электрической сетью следует рассматривать каждый агрегат в качестве одномассовой крутильной системы (рис. 3). Собственная частота одноузловой формы колебаний имеет один узел в зоне условной электрической связи между генераторами, а наибольшие амплитуды этой формы колебаний A_2 и A_3 (см. рис. 1), A_1 и A_2 (см. рис. 2, а), A (см. рис. 2, б) определяются величиной синхронизирующего момента и жесткостью условной связи между агрегатами.

а)



б)

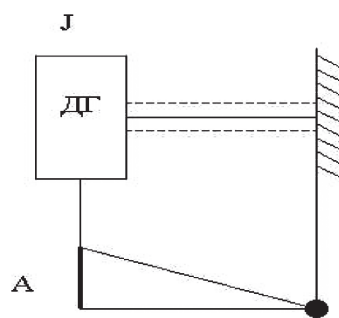


Рис. 2. Упрощенные крутильные схемы работы дизель-генератора:
а — двухмассовая схема; б — одномассовая схема на мощную сеть

Наличие источника «возмущения» с частотой 2,8–3,4 Гц, из-за нестабильной работы топливной аппаратуры дизеля от цикла к циклу через рабочий процесс в цилиндрах, приводит к резонансным колебаниям в системе. В результате имеют место перетоки электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами, а также сопровождающие это явление ухудшения качества работы и снижение показателей эффективности установок.

Теоретические аспекты природы обменных колебаний. Экспериментальным и расчетным путем был установлен не только источник возмущения, но и сама природа явлений в системе топливоподачи дизеля, приводящих к неудовлетворительной параллельной, а в ряде случаев и одиночной, работе дизель-генераторов [1, 2, 5, 6]. В исследованиях авторов [5–7] показано, что при вводе нескольких ДГ в параллельную работу образуется крутильная система, представленная на рис. 1. Объединив вращающиеся массы ДГ в одну, получим упрощенную двухмассовую систему, представленную на рис. 2). Эксперимент подтверждает данное представление о параллельной работе ДГ. Для ДГ, работающего на мощную сеть, можно составить дифференциальное уравнение движения первого порядка

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = c \varphi. \quad (1)$$

Здесь J — суммарный приведенный момент инерции роторов дизеля и генератора;

c — жесткость условного упругого вала, эквивалентно заменяющая электрическую связь ДГ с мощной электрической сетью,

$$c = \frac{J_p G}{l},$$

где J_p — соответственно полярный момент инерции сечения условного вала;

G, l — соответственно модуль упругости второго рода материала и длина условного вала.

Жесткость (электрическая) для условного вала выражается через электрический синхронизирующий момент M_s :

$$cd\varphi = t_{so} d\varphi,$$

где t_{so} — жесткость условной электрической связи, определяемая как $t_{so} = \frac{M_s}{2}$.

Жесткость электрической связи зависит от нагрузки (расчеты выполняются по формулам, предложенным И. Д. Урусовым). Решение уравнения (1) получим следующей подстановкой:

$$d\varphi = A \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (2)$$

где A — амплитуда колебаний;

α — фазовый угол (для идеальной системы $\alpha = 90^\circ$);

ω — круговая частота колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f_c$;

T — период колебаний;

f_c — собственная частота крутильных колебаний, Гц.

После преобразований (1) получим $A \sin(\omega t + \alpha) \left[\frac{J}{t_{so}} \omega^2 - 1 \right]$. Далее имеем $\omega = \sqrt{\frac{t_{so}}{J}}$. Таким образом, собственная частота крутильных колебаний параллельно работающего с мощной сетью дизель-генератора с учетом принятых допущений

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{t_{so}}{J}}. \quad (3)$$

Так как значение t_{so} зависит от нагрузки, при изменении нагрузки величина f_c изменяется в определенном диапазоне. По материалам, полученным на стенде завода «Дальдизель» ДГР150/750, выполним проверку соответствия формулы (3) экспериментальным данным [6, 7]. Так, при замене штатного маховика с $J = 171 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ маховиком судового дизеля с $J = 68 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ для режима 25 %-й нагрузки f_c изменилась с 2,53 Гц до 3,75 Гц, т. е. в соотношении $\frac{2,53}{3,75} = 0,674$. Соотношение, полученное из формулы (3), равно 0,8, что находится в пределах точности эксперимента и обработки результатов. При параллельной работе ДГР 150/750 при $J = 290 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ без нагрузки $f_c = 2,05 \text{ Гц}$, t_{so} , по данным режима $t_{so} = 60500 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$. Для режима 25 % имеем, соответственно, 2,53 Гц и 93500, для режима 100 % — 4,16 Гц и 283000, что также соответствует данным эксперимента.

Математическое моделирование параллельной работы дизель-генераторов для применения в опытно-конструкторских работах в рамках исследуемой проблемы. Для разнотипных дизель-генераторов следует принять схему на рис. 2. Тогда в системе уравнений динамического равновесия, эквивалентно замещающей два параллельно работающих ДГ, получим математическую модель параллельно работающих разнотипных ДГ:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d^2 d\varphi_1}{dt^2} + t_{so} (d\varphi_2 - d\varphi_1) = 0; \\ J_2 \frac{d^2 d\varphi_2}{dt^2} + t_{so} (d\varphi_1 - d\varphi_2) = 0. \end{cases}$$

Решение этих уравнений получим путем введения подстановок:

$$\begin{cases} d\varphi_1 = A_1 \sin(\omega t + \alpha); \\ d\varphi_2 = A_2 \sin(\omega t + \alpha). \end{cases}$$

Определим значение круговой частоты колебаний ω , считая, что уравнения однородны относительно амплитуд A_1 и A_2 :

$$\omega'' = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} t_{so}}.$$

Определим соотношение амплитуд $A_2 = -A_1 \frac{J_2}{J_1} \text{ и } f_A'' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} t_{so}}$ (верхние индексы

для схемы на рис. 2).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для устранения в системе параллельно работающих генераторов околорезонансных колебаний необходимо комплектовать судовую электростанцию двумя разнотипными ДГ.

Жесткость условной электрической связи при работе на мощную сеть в два раза больше, чем при параллельной работе двух ДГ. Поэтому соотношение собственных частот крутильных схем равно единице. Становится ясно, что параллельная работа двух одинаковых ДГ эквивалентна параллельной работе одного ДГ с мощной сетью. Следовательно, при заводских испытаниях ДГ целесообразно и экономически выгодно заменять два параллельно работающих ДГ одним, работающим на мощную сеть с утилизацией вырабатываемой энергии [6, 8, 9].

В условиях повышенных перетоков электрической энергии в околорезонансных режимах существенно возрастают величина M_3 и собственная частота крутильной схемы. Таким образом, f_c возрастает вплоть до полного совпадения с частотой возмущающих сил $f = n / 240$ Гц, где n — частота вращения ДГ. Таким образом, имеет место автоподстройка системы параллельно работающих ДГ на резонансный режим, что подтверждается экспериментально.

Вследствие геометрического и физического подобия ДГ и применения единой методики комплектования электрических установок на режимах малых нагрузок имеет место близость частоты субгармонического источника возмущения по линии топливной аппаратуры с собственной частотой крутильной схемы параллельно работающих ДГ. Знание собственной частоты проектируемого ДГ позволяет обеспечить рациональную комплектацию его составляющих компонентов, исключаящую околорезонансные колебания системы.

Существенно отличается соотношение частот вынуждающих сил и собственных колебаний системы в случае использования двухтактных дизелей, у которых частота вынуждающих сил равна $f = n / 120$ Гц. Примером этого является параллельная работа двух дизель-генераторов с двухтактными дизелями типа 6Д19/21 Балаковского дизелестроительного завода.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Представлены аспекты параллельной работы дизель-генераторов и определены возможные крутильные схемы для различных случаев, показаны подходы к определению параметров крутильной системы на основе экспериментального исследования.
2. Сформирована математическая модель для характерного случая эксплуатации и представлено ее решение.
3. В ходе проведения заводских испытаний дизель-генераторов целесообразно и экономически выгодно выполнять замену двух параллельно работающих дизель-генераторов одним, работающим на мощную сеть с утилизацией вырабатываемой энергии.
4. Реализация математической модели на вычислительных машинах явится мощным инструментарием для решения всех проблем обменных колебаний.
5. Соотношение частот вынуждающих сил и собственных колебаний системы в случае применения двухтактных приводных дизелей существенно отличается в лучшую сторону от полученного в случае применения четырехтактных приводных дизелей. Следовательно, целесообразным является возвращение к использованию двухтактных дизелей в качестве привода генераторов переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский Л. В. Управление параллельной работой современных судовых многогенераторных электростанций / Л. В. Вишневский, И. П. Козырев, А. Е. Савенко // Судовые энергетические установки. — 2007. — № 19. — С. 87–91.
2. Голубков Л. Н. Математическое моделирование рабочих процессов и шумообразования дизеля / Л. Н. Голубков, М. Г. Шатров, Л. А. Емельянов, К. П. Дьяконова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2006. — № 10. — С. 33–41. — EDN TXOKMV.

3. Марков В. А. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. И. Мальчук. — Москва: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2007. — 360 с. — EDN VCQHNL.

4. Горелик Г. Б. К вопросу о «перетекании» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых режимах нагрузки при резонансных колебаниях / Г. Б. Горелик, С. А. Жуков // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы международной конференции «Двигатели 2002». — Вып. 2. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. — С. 140–146.

5. Горелик Г. Б. Проблема обменных колебаний электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых нагрузках с точки зрения экономики и надежности / Г. Б. Горелик // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы международной конференции «Двигатели 2002». — Вып. 2. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002. — С. 162–166.

6. Горелик Г. Б. Процессы топливоподачи в дизелях: природа межцикловой неустойчивости, моделирование и расчет / Г. Б. Горелик. — Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2015. — 246 с.

7. Кича Г. П. Полнопоточная комбинированная фильтрованием и центрифугированием тонкая очистка моторного масла в судовых дизелях / Г. П. Кича, Л. А. Семенюк // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 2. — С. 62–69. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-62-69. — EDN UOSWGO.

8. Кича Г. П. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием / Г. П. Кича, Л. А. Семенюк, М. И. Тарасов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 1–2(47). — С. 105–112. — DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.075. — EDN UCDILA.

9. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. — New York: Springer, 2002. — 423 p.

REFERENCES

1. Vishnevskiy, L. V., I. P. Kozyrev and A. E. Savenko. “Upravlenie parallel’noy rabotoy sovremennykh sudovykh mnogogeneratornykh elektrostantsiy.” *Sudovye energeticheskie ustanovki* 19 (2007): 87–91.

2. Golubkov, L. N., M. G. Shatrov, L. A. Emel’yanov and K. P. D’yakonova. “Matematicheskoe modelirovanie rabochikh protsessov i shumobrazovaniya dizelya.” *Bmstu Journal Of Mechanical Engineering* 10 (2006): 33–41.

3. Markov, V. A., S. N. Devyanin and V. I. Mal’chuk. *Vпрыскивание и распыливание топлива в дизелях* Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet im. N. E. Baumana, 2007: 360.

4. Gorelik, G. B. and S. A. Zhukov. “K voprosu o “peretekanii” elektricheskoy moschnosti pri parallel’noy rabote dizel’-generatorov na dolevykh rezhimakh nagruzki pri rezonansnykh kolebaniyakh.” *Aktual’nye problemy sozdaniya i ekspluatatsii kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii “DVIGATELI 2002”*. Vyp. 2. Khabarovsk: Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta, 2002: 140–146.

5. Gorelik, G. B. “Problema obmennykh kolebaniy elektricheskoy moschnosti pri parallel’noy rabote dizel’-generatorov na dolevykh nagruzkakh s tochki zreniya ekonomiki i nadezhnosti.” *Aktual’nye problemy sozdaniya i ekspluatatsii kombinirovannykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii “DVIGATELI 2002”*. Vyp. 2. Khabarovsk: Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta, 2002: 162–166.

6. Gorelik, G. B. *Protsessy toplivopodachi v dizelyakh: priroda mezhsiklovoy nestabil’nosti, modelirovanie i raschet* Khabarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2015: 246.

7. Kicha, G. P. and L. A. Semenyuk. “Full-flow combined by filtration and by centrifugation thin cleaning of motor oil in ship diesels.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2018): 62–69. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-62-69.

8. Kicha, G. P., L. A. Semenyuk and M. I. Tarasov. “Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk.” *Morskie intellektual’nye tekhnologii* 1–2(47) (2020): 105–112. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.075.

9. Ferziger, J.H., Peric M. *Computational Metods for Fluid Dynamics*. New York: Springer, 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич Соболенко —
доктор технических наук, профессор
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: sobolenko_a@mail.ru
Геннадий Бенцианович Горелик — доктор
технических наук, профессор
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: ggorelik@mail.ru
Чистяков Александр Юрьевич —
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский Морской технический
университет
190121, город Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, дом 3
e-mail: glucker2000@gmail.ru.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sobolenko, Anatoly N. —
Dr. of Technical Sciences, Professor
Maritime State University named after admiral
G. I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: sobolenko_a@mail.ru
Gorelik, Gennady B. —
Dr. of Technical Sciences, Professor
Maritime State University
named after admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: ggorelik@mail.ru
Chistyakov, Alexander Yu. —
Phd of Technical Sciences
St. Petersburg Maritime Technical
University, St. Petersburg
3, Lotsmanskaya Ulitsa, Sankt-Peterburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: glucker2000@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 16 мая 2025 г.
Received: May 16, 2025.*