

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-74-81
УДК 681.5.033.2:621.436:629.5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

А. А. Панасенко

*Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация*

Исследования эффективности работы энергетических объектов проводятся в основном по их статическим характеристикам. Если динамические процессы занимают значительную часть бюджета и времени объекта, то существует необходимость дополнительного учета потерь энергии во время переходных процессов. Необходимо на основе анализа выбрать настроечные параметры регуляторов объектов. Отмечено недостаточное количество публикаций, посвященных обозначенной проблеме. Сделана попытка оценить дополнительные потери энергии главного двигателя, работающего на винт транспортного судна. Для анализа переходного процесса зависимости частоты вращения от времени принято считать, что вызван этот процесс резким изменением момента сопротивления на заданную величину. В целях оценки зависимости частоты вращения от времени предложено использовать программу Excel. В качестве выводящего из статического равновесия изменения выбрано значение 10 % от номинальной величины задающего или возмущающего воздействий. Для сравнения различных переходных процессов предложено использовать величину длины переходного процесса во времени. Оценка энергетических потерь проводилась по коэффициенту увеличения затрат мощности за время переходного процесса. Доказано, что дополнительные потери энергии из-за наличия переходных процессов при 10-процентном возмущении составляют более 1,0–1,5 % номинальной мощности объекта регулирования. При изменении настроечных параметров системы автоматического регулирования эти потери можно уменьшить. Обнаружено, что корректировка настроечных параметров системы автоматического регулирования для уменьшения потерь энергии при возмущающих воздействиях приводит к увеличению потерь энергии при задающих воздействиях.

Ключевые слова: статические характеристики, динамические процессы, переходные процессы, настроечные параметры, задающие и возмущающие воздействия, судовые дизели, судовые энергетические установки, автоматическое регулирование.

Для цитирования: *Панасенко А. А.* Оценка эффективности работы судового двигателя в динамических процессах // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* 2021. № 3. С. 74–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-74-81.

Введение

Для обеспечения требуемых характеристик различных элементов судовой энергетической установки необходимо настраивать их статический и динамический режимы. В случае работы механизма преимущественно в статическом (квазистатическом) режиме настройка динамического режима будет не настолько актуальна, как в случае работы механизма на длительных, практически постоянных переходных процессах.

Работа основного механизма – главного двигателя транспортного судна – зависит от состояния и температуры моря, а также от направления и силы ветра. Заданный скоростной режим при увеличении температуры моря снижается автоматически или вручную для того, чтобы не допустить перегрева двигателя.

Работа судовых дизелей в условиях эксплуатации характеризуется частыми и резкими изменениями скоростных и нагрузочных режимов. Такого рода изменения определяются скоростью движения судна, маршрутом движения, загруженностью, направлением и силой ветра, временем года и суток. Каждое изменение нагрузки сопровождается переходным процессом в двигателе.

Вопросу снижения потерь теплоты судовых дизелей в условиях эксплуатации уделяется определенное внимание. В работах [1, 2] предложено использовать теплонасосную установку, в работе [3] в качестве целевой функции принята энергоэффективность судна, а в качестве мероприятий по ее повышению утилизацию сбросовой теплоты предложили дополнить переходом на газомоторное топливо. Вопросу энергосбережения путем улучшения системы управления уделяется недостаточно внимания, среди известных исследований можно указать работы [4, 5].

Снижение динамических нагрузок на энергетическую установку судна, исключение продолжительной холостой работы и энергосбережение являются одними из актуальных задач совершенствования систем управления судовых механизмов. Кроме этого, оценка потерь энергии из-за динамических процессов была бы интересна с позиции формирования запаса и списания затраченного топлива.

Постановка задачи исследования

В настоящем исследовании поставлена задача оценки потерь энергии из-за динамических процессов. Предлагается смоделировать в среде Excel динамические процессы изменения частоты вращения главного судового двигателя и посредством математического аппарата оценить качество этих процессов.

Используя методы приближенного вычисления, построим динамическую характеристику системы автоматического регулирования (САР) по известным уравнениям составляющих системы звеньев и по структурной схеме САР (рис. 1).

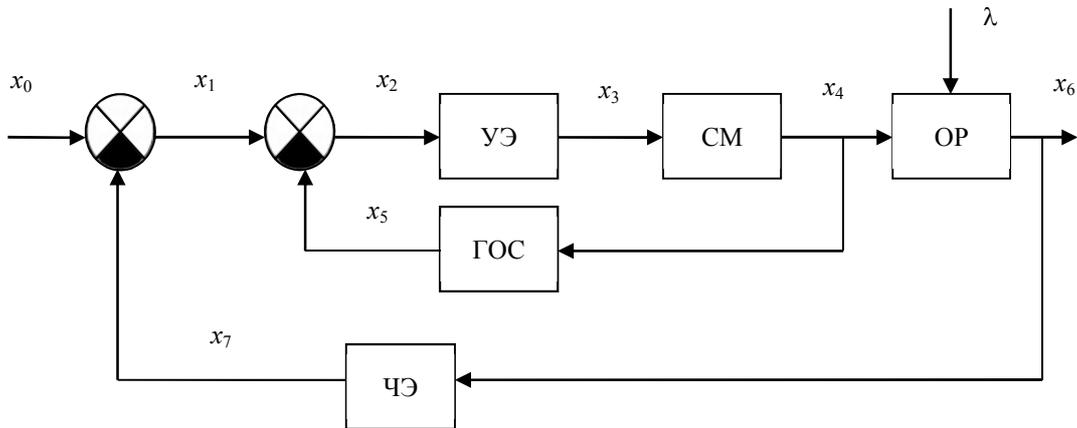


Рис. 1. Структурная схема САР: ЧЭ – чувствительный элемент; УЭ – усилительный элемент; СМ – сервомотор; ОР – объект регулирования; ГОС – гибкая обратная связь

Уравнения элементов системы автоматического регулирования

Вспользуемся уравнениями:

- чувствительного элемента:

$$x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{ЧЭ}} x_{\text{ВХ}}; \quad (1)$$

- усилительного элемента:

$$x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{УЭ}} x_{\text{ВХ}}; \quad (2)$$

- сервомотора:

$$T_{\text{СМ}}(dx_{\text{ВЫХ}}/dt) = x_{\text{ВХ}}; \quad (3)$$

- объекта регулирования:

$$T_{\text{ОР}}(dx_{\text{ВЫХ}}/dt) + x_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{ОР}} x_{\text{ВХ}} - k_{\lambda} \lambda; \quad (4)$$

– гибкой обратной связи:

$$T_1(dx_{\text{ВЫХ}}/dt) + x_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{И}}dx_{\text{ВХ}}/dt, \quad (5)$$

где λ – относительное отклонение возмущающего воздействия (относительное изменение нагрузки); $x_{\text{ВЫХ}}$, $x_{\text{ВХ}}$ – выходная и входная координата элемента САР; $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ – выходные и входные координаты элементов САР (рис. 1).

Числовые значения коэффициентов дифференциальных уравнений для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Числовые значения коэффициентов дифференциальных уравнений для расчета САР при изменении нагрузки

$T_{\text{И}}, \text{с}$	$T_{\text{И}}, \text{с}$	$T_{\text{ОР}}, \text{с}$	$k_{\text{ОР}},$ отн. ед.	$k_{\lambda},$ отн. ед.	$k_{\text{УЭ}},$ отн. ед.	$k_{\text{ЧЭ}},$ отн. ед.	$T_{\text{СМ}}, \text{с}$	Переходный процесс
1	0,8	0,7	1	1	0,5	1	1	Вызван увеличением λ на 10 %

Формулы для определения динамической характеристики системы автоматического регулирования при заданном изменении возмущающего воздействия

Приближенный расчет проведем, руководствуясь следующей логикой.

1. При скачке λ в САР первым реагирует объект регулирования. Меняем дифференциал на конечное приращение в дифференциальных уравнениях (1)–(5):

$$\Delta x_6 = \frac{(k_{\text{ОР}}x_4 - k_{\lambda}\lambda - x_6)\Delta t}{T_{\text{ОР}}}, \quad x_{61} = \Delta x_{60} + x_{60}, \quad x_{62} = \Delta x_{61} + x_{61} \text{ и т. д.} \quad (6)$$

Вторая цифра подстрочного индекса означает момент времени от начала возмущения.

2. Следующий элемент, реагирующий на изменение, – это чувствительный элемент:

$$x_7 = k_{\text{ЧЭ}}x_6. \quad (7)$$

3. Далее по структурной схеме следует элемент сравнения:

$$x_1 = -x_7. \quad (8)$$

4. Следующий по структурной схеме – второй элемент сравнения:

$$x_2 = x_1 - x_5. \quad (9)$$

5. Следующий – усилительный элемент:

$$x_3 = k_{\text{УЭ}}x_2. \quad (10)$$

6. Далее по структурной схеме – сервомотор:

$$\Delta x_4 = \frac{x_3\Delta t}{T_{\text{СМ}}}, \quad x_{41} = \Delta x_{40} + x_{40}, \quad x_{42} = \Delta x_{41} + x_{41} \text{ и т. д.} \quad (11)$$

7. Сигнал от сервомотора следует на гибкую обратную связь:

$$\Delta x_5 = \frac{T_{\text{И}}\Delta x_4 - x_5\Delta t}{T_1}, \quad x_{51} = \Delta x_{50} + x_{50}, \quad x_{52} = \Delta x_{51} + x_{51} \text{ и т. д.} \quad (12)$$

Далее в расчете повторяем уравнения (6)–(12). Сервомотор изменяет сигнал, идущий на объект регулирования, и все семь пунктов повторяются.

После некоторых вычислений выделяем несколько ячеек и тянем их вниз по столбцу. Программа Excel автоматически повторяет формулы и расчет.

Выделяем столбцы x_6 и t , строим график $x_6 = f(t)$ (рис. 2).

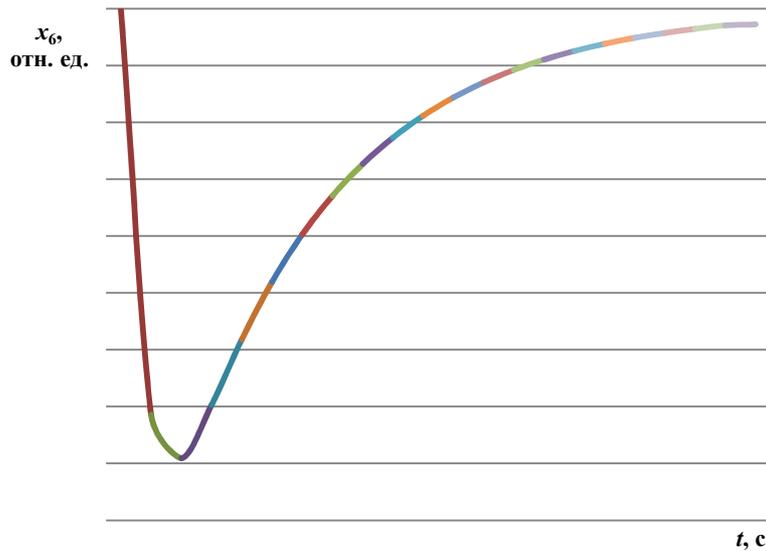


Рис. 2. Динамическая характеристика системы регулирования при увеличении нагрузки λ на 10 % и настроечных параметрах регулятора $T_{и} = 0,8$ с; $k_{уэ} = 0,5$ отн. ед.

Анализ качества переходного процесса оценивается по максимальному забросу параметра, длительности неустойчившегося режима, а также используются интегральные показатели качества. Так как эти процессы могут отличаться наличием статизма САР, перерегулирования, декремента затухания и т. д., должен быть показатель, не зависящий от вида кривой. Предлагается использовать следующий показатель – величину длины переходного процесса.

Следующие рассуждения приводят к мысли использования этого показателя. При движении материальной точки по какому-либо пути величина перемещения пропорциональна энергии, затрачиваемой на это перемещение. Следовательно, если сравнить перемещение материальной точки по кривой переходного процесса с перемещением по прямой, отношение будет пропорционально дополнительным затратам энергии. В нашем случае происходит не перемещение, а скорость перемещения материальной точки. Так как принятое изменение нагрузки (относительного крутящего момента на валу) является скачкообразным, а после скачка остается постоянным, изменение скорости вращения пропорционально изменениям мощности. В этом случае оптимальный переходный процесс – тот, при котором будут минимальные потери энергии в динамических режимах.

Расчет отрезка длины кривой ведем по формуле

$$\Delta l = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta t)^2},$$

где Δx – отклонение регулируемой величины; Δt – отрезок времени, за который произошло отклонение регулируемой величины Δx .

Расчет длины кривой переходного процесса ведем по формуле

$$l = \sum_0^{t_k} \Delta l_i,$$

где 0 – время начала переходного процесса; t_k – время окончания переходного процесса.

Длина кривой переходного процесса (l) для рис. 2 равна 11,02685 отн. ед. Длина прямой линии (l) за это же время равна 11,0 отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,00244 раза, т. е. на 0,244 %.

Изменяем время изодрома до величины $T_{и} = 0,7$, получаем $l = 11,0261$ отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,00237 раза, т. е. на 0,237 %. Потери энергии снизились на 0,07 %.

Увеличиваем коэффициент усиления $k_{yЭ}$ до величины $k_{yЭ} = 0,6$; $l = 11,02253$ отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,00205 раза, т. е. на 0,205 %. Кривая переходного процесса, соответствующая последнему случаю, изображена на рис. 3.

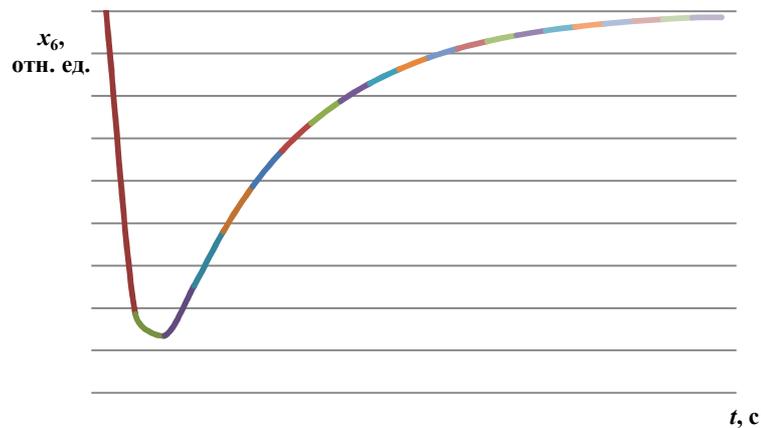


Рис. 3. Динамическая характеристика системы регулирования при увеличении нагрузки λ на 10 % и настроечных параметрах регулятора $T_I = 0,7$ с; $k_{yЭ} = 0,6$ отн. ед.

Согласно рис. 3 уменьшился заброс, более круто (по сравнению с рис. 2) восстанавливается параметр, все это учитывается по длине кривой переходного процесса.

Переходные процессы также бывают вызваны изменением задания на регулятор. Рассматриваем случай изменения x_0 на 10 %, $\lambda = 0$. Числовые значения коэффициентов дифференциальных уравнений для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Числовые значения коэффициентов дифференциальных уравнений для расчета САР при изменении задающего воздействия

T_I , с	T_I , с	T_{OP} , с	k_{OP} , отн. ед.	k_{λ} , отн. ед.	$k_{yЭ}$, отн. ед.	$k_{чЭ}$, отн. ед.	T_{CM} , с	Переходный процесс
1	0,7	2	1	1	0,6	1	1	Вызван увеличением x_0 на 10 %

Приближенный расчет ведем согласно (1)–(5), руководствуясь следующей логикой.

1. При скачке x_0 в САР первым реагирует элемент сравнения, x_0 в момент, равный нулю, становится не равен x_7 (см. рис. 1):

$$x_1 = x_0 - x_7, \quad x_{11} = 1 - x_{70} = 0,1. \quad (13)$$

2. Следующий элемент сравнения по структурной схеме сравнивает сигналы x_1 и x_5 :

$$x_2 = x_1 - x_5, \quad x_{21} = 1 - x_{50} = 0,1. \quad (14)$$

3. Далее по структурной схеме – усилительный элемент:

$$x_3 = k_{yЭ}x_2. \quad (15)$$

4. Следующий – сервомотор:

$$\Delta x_4 = \frac{x_3 \Delta t}{T_{CM}}, \quad x_{41} = \Delta x_{40} + x_{40}, \quad x_{42} = \Delta x_{41} + x_{41} \text{ и т. д.} \quad (16)$$

5. Сигнал от сервомотора следует на изодром:

$$\Delta x_5 = \frac{T_I \Delta x_4 - x_5 \Delta t}{T_I}, \quad x_{51} = \Delta x_{50} + x_{50}, \quad x_{52} = \Delta x_{51} + x_{51} \text{ и т. д.} \quad (17)$$

6. Сигнал от сервомотора передается на объект регулирования:

$$\Delta x_6 = \frac{(k_{OP}x_4 - x_6)\Delta t}{T_{OP}}, \quad x_{61} = \Delta x_{60} + x_{60}, \quad x_{62} = \Delta x_{61} + x_{61} \text{ и т. д.} \quad (18)$$

7. Следующий элемент, реагирующий на изменение, – это чувствительный элемент:

$$x_7 = k_{ЧЭ}x_6. \quad (19)$$

Далее расчет идет по замкнутому кругу и все семь уравнений (13)–(19) повторяются.

После нескольких вычислений выделяем некоторые ячейки и тянем их вниз по столбцу.

Программа Excel автоматически повторяет формулы и расчет.

Далее выделяем столбцы x_6 и t , строим график $x_6 = f(t)$ (рис. 4).

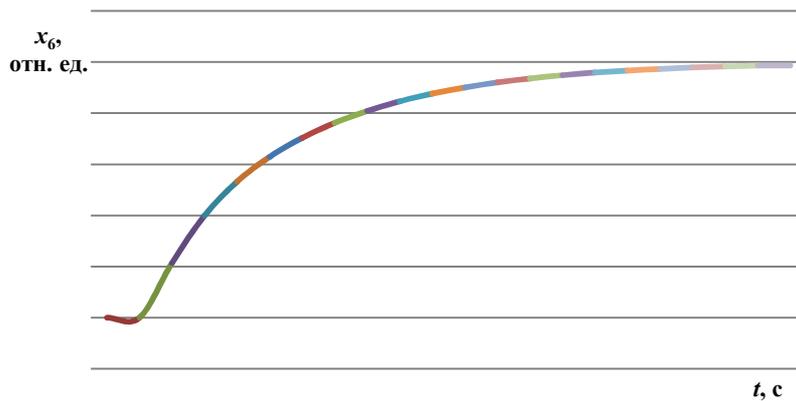


Рис. 4. Динамическая характеристика системы регулирования при увеличении настройки x_0 на 10 % и настроечных параметрах регулятора $T_{И} = 0,7$ с; $k_{УЭ} = 0,6$ отн. ед.

Длина кривой переходного процесса (l) для рис. 4 равна 11,15054 отн. ед. Длина прямой линии (l) за это же время равна 11,0 отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,01369 раза, т. е. на 1,37 %.

При уменьшении коэффициента усиления $k_{УЭ}$ до величины 0,5 – $l = 11,14155$ отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,01261 раза, т. е. на 1,26 %.

Изменяем время изодрома до величины $T_{И} = 0,8$, получаем $l = 11,1387$ отн. ед. Соответственно, потери энергии на этом промежутке времени возросли в 1,012609 раза, т. е. на 1,26 %. Потери энергии снизились незначительно.

Кривая переходного процесса, соответствующая последнему случаю, изображена на рис. 5.

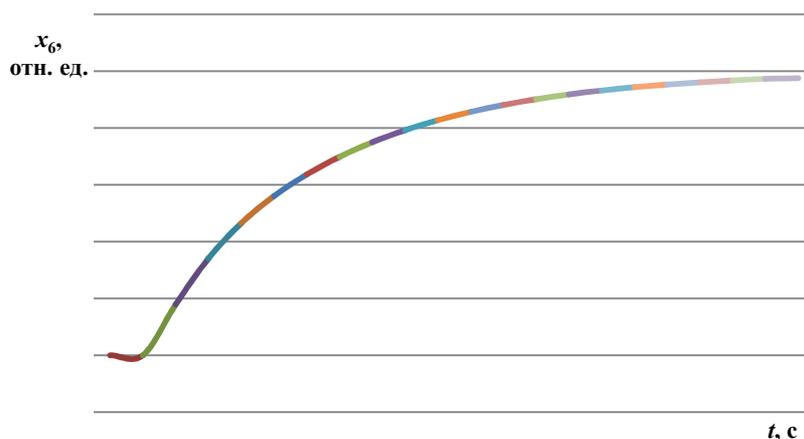


Рис. 5. Динамическая характеристика системы регулирования при увеличении настройки x_0 на 10 % и настроечных параметрах регулятора $T_{И} = 0,8$ с; $k_{УЭ} = 0,5$ отн. ед.

Согласно результатам расчетов потери в динамическом процессе, вызванном изменением нагрузки, снижаются при увеличении коэффициента усиления регулятора и при уменьшении времени изодрома. Но потери в динамическом процессе, вызванном изменением настройки, возрастают при увеличении коэффициента усиления регулятора и при уменьшении времени изодрома.

Заключение

Преимущество предложенной в статье оценки динамического процесса по длине кривой на его графике состоит в том, что она дает единую числовую оценку качества переходного процесса так же, как и интегральные оценки. Однако недостаток этой оценки, как и интегральной, в том, что одному и тому же значению оценки могут соответствовать разные формы переходного процесса, что создает некоторую неопределенность при решении задачи выбора параметров САР. Достоинством оценки динамического процесса по длине кривой на его графике, по сравнению с интегральными оценками, является меньшая трудоемкость ее выполнения.

Установлено также, что улучшение предложенного показателя оценки качества динамического процесса при изменении нагрузки в противоположность ухудшает этот показатель при изменении настройки (уставки).

В статье была обозначена проблема улучшения качества совершенствования систем управления судовых механизмов и оценки потерь энергии из-за динамических процессов с точки зрения формирования запаса и списания затраченного топлива. Была поставлена задача оценить потери энергии из-за динамических процессов, для чего предложено смоделировать в среде Excel динамические процессы изменения частоты вращения главного судового двигателя и посредством математического аппарата оценить качество этих процессов. Соответствующая задача была решена. Полученный результат может быть использован для корректировки и выбора параметров регуляторов скорости, оптимизации работы механизмов при наличии подтверждающих экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волынец А. В., Соболенко А. Н.* Утилизация тепловых потерь главного судового двигателя посредством использования теплонасосной установки // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. Вып. 5 (39). С. 144–150.
2. *Волынец А. В., Соболенко А. Н.* Выбор хладагента для теплонасосных установок при утилизации теплоты на судах // Мор. интеллектуал. технологии. 2018. № 4 (42). Т. 5. С. 95–99.
3. *Волынец А. В., Соболенко А. Н.* Повышение энергоэффективности морского судна посредством использования природного газа и утилизации теплоты главного дизеля // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всерос. нац. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 г.). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2019. Ч. 3. С. 16–19.
4. *Линецкий С. Б., Цирлин А. М.* Оценка термодинамического совершенства и оптимизация теплообменников // Теплоэнергетика. 1988. № 10. С. 87–91.
5. *Цирлин А. М.* Методы оптимизации в необратимой термодинамике и микроэкономике. М.: Физматлит, 2003. 416 с.

Статья поступила в редакцию 12.04.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Андрей Александрович Панасенко – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации автоматизированных судовых энергетических установок; Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского; Россия, 690003, Владивосток; Panasenko2005@yandex.ru.



ESTIMATING MARINE ENGINE EFFICIENCY IN DYNAMIC PROCESSES

A. A. Panasenko

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

Abstract. The article considers the problem of efficiency of energy objects, which is mainly estimated on the basis of their static characteristics. If dynamic processes take up a significant part of the object's time and budget, then there is a need for additional account of energy losses in transient processes. Using the analysis results it is necessary to select the settings of the object regulators. The problem hasn't been thrown much light on in the publications. An attempt has been made to estimate the additional energy losses of the main engine operating on the propeller of a transport ship. To analyze the transient process of the dependence of the rotation speed on time, it is assumed that this process is caused by a sharp change in the moment of resistance by a given value. The Excel program was proposed to assess the dependence of the rotation speed on time. 10% of the nominal value of the setting or disturbing influences was chosen as the change leading out of the static equilibrium. To compare various transient processes it is proposed to use the value of the length of the transient process in time. Assessing energy losses was carried out by using the coefficient of increasing power consumption during the transient process. The additional energy losses were proved to make more than 1.0 - 1.5% of the nominal power of the controlled object due to the presence of transient processes at 10% disturbance. By changing the settings of the automatic control system (ACS) these losses can be reduced. It has been found that adjusting the ACS settings to reduce energy losses under disturbing influences leads to the higher energy losses during reference influences.

Key words: static characteristics, dynamic processes, transient processes, setting parameters, setting and disturbing influences, marine diesel engines, marine power plants, automatic regulation.

For citation: Panasenko A. A. Estimating marine engine efficiency in dynamic processes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3:74-81. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-74-81.

REFERENCES

1. Volyntsev A. V., Sobolenko A. N. Utilizatsiia teplovykh poter' glavnogo sudovogo dvigatel'ia posredstvom ispol'zovaniia teplonasosnoi ustanovki [Utilization of heat losses of main ship engine by using heat pump unit]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, iss. 5 (39), pp. 144-150.
2. Volyntsev A. V., Sobolenko A. N. Vybor khladagenta dlia teplonasosnykh ustanovok pri utilizatsii teploty na sudakh [Choosing refrigerant for heat pump units for heat utilization on ships]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 5, pp. 95-99.
3. Volyntsev A. V., Sobolenko A. N. Povyshenie energoeffektivnosti morskogo sudna posredstvom ispol'zovaniia prirodnogo gaza i utilizatsii teploty glavnogo dizel'ia. Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy [Improving energy efficiency of sea vessel by using natural gas and utilizing heat of main diesel engine. Youth and Science: Actual Problems of Fundamental and Applied Research]. *Materialy II Vserossiiskoi natsional'noi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh (Komsomol'sk-na-Amure, 08–12 aprelia 2019 g.)*. Komsomol'sk n/A, Izd-vo KnAGU, 2019. Part 3. Pp. 16-19.
4. Linetskii S. B., Tsirlin A. M. Otsenka termodinamicheskogo sovershenstva i optimizatsiia teplotobmennikov [Evaluating thermodynamic perfection and optimization of heat exchangers]. *Teploenergetika*, 1988, no. 10, pp. 87-91.
5. Tsirlin A. M. *Metody optimizatsii v neobratimoi termodinamike i mikroekonomike* [Optimization methods in irreversible thermodynamics and microeconomics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 416 p.

The article submitted to the editors 12.04.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei A. Panasenko – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Automated Ship Power Plants Operation; Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy; Russia, 690003, Vladivostok; Panasenko2005@yandex.ru.

