

УДК 62-551.4

DOI: 10.37890/jwt.vi86.683

Влияние настроечных параметров регулятора частоты вращения на переходный процесс

А.А. Панасенко

ORCID: 0000-0003-2067-884X

С.В. Петрашёв

ORCID: 0000-0003-3183-5150

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы регулирования частоты вращения судовых главных двигателей при синусоидальном изменении момента сопротивления на валу. Заданы внешние условия режима нагрузки главного двигателя по максимальному значению и периоду колебаний. Указаны отрицательные факторы для судна и двигателя вследствие периодических колебаний нагрузки. Также проанализированы процессы при скачкообразном изменении задания на регулятор частоты вращения. Представлены переходные процессы при различных настроечных параметрах ПИД-регуляторов. Для сравнительного анализа переходных процессов взяты три различные области устойчивых процессов диаграммы Вышнеградского.

Ключевые слова: ветровые волны, синусоидальные колебания, настроечные параметры, колебательный процесс, аperiodический процесс, диаграмма Вышнеградского, метод настройки Зиглера-Никольса.

The influence of speed controller settings on the transitional process

Andrey A. Panasenko

ORCID: 0000-0003-2067-884X

Sergey V. Petrashev

ORCID: 0000-0003-3183-5150

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok, Russia

Abstract: The issues of regulating the rotational speed of marine main engines with a sinusoidal change in the moment of resistance on the shaft are considered. The external conditions of the main engine load mode are set according to the maximum value and the oscillation period. Negative factors for the vessel and the engine due to periodic load fluctuations are indicated. The processes are also analyzed in case of a sudden change in the speed control setting. Transients are presented for various tuning parameters of PID controllers. For a comparative analysis of transient processes, three different areas of stable processes of the Vyshnegradsky diagram are taken.

Keywords: wind waves, sinusoidal oscillations, tuning parameters, oscillatory process, aperiodic process, Vyshnegradsky diagram, Ziegler-Nichols tuning method

Введение

Морские перевозки всегда связаны с непростыми условиями. Суда выполняют свою работу при сильном волнении, в шторм или, даже, в ураган. Несмотря на такие опасности, современные суда продолжают следовать своим маршрутам, не отклоняясь от графика. Штормы – неизбежная часть проблем при перемещении различных судов [1].

Основным типом главных двигателей на морских судах являются двигатели внутреннего сгорания, мощность которых достигает 80000 кВт. Скорость судна с механическим двигателем при сильных попутных ветрах снижается. Основной причиной этого является сопротивление движению судна, вызванное волнением и ухудшением работы гребного винта [2]. При слабом встречном ветре судно мало теряет скорость, при сильном – ход уменьшается из-за дополнительного сопротивления, вызванного волнением. Сопротивление движению на волнении возрастает с увеличением амплитуд килевой и вертикальной качки. Периоды установившихся ветровых волн могут быть от 0,33 с (скорость ветра от 0,5 до 1,5 м/с) до 18 с (скорость ветра от 32 м/с) [1].

Периодическое оголение винта и перебой в работе ускоряют износ двигателя, изменяют режим плавания судна [5]. Возмущающим воздействием на двигатель при нахождении судна в море могут быть синусоидальные колебания.

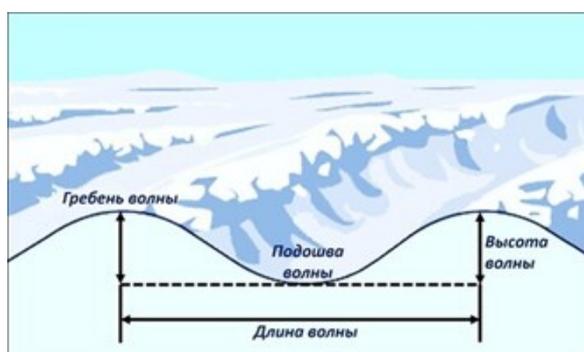


Рис. 1. Синусоидальная волна

В океане чаще всего встречаются волны длиной 90-100 м, высотой 4-5 м и периодом 7-9 с. Самые длинные из наблюдавшихся волн – 900 м (высота 18-20 м). Для правильного маневрирования на взволнованном море необходимо объективно оценивать степень волнения. Волнение оценивается в баллах в зависимости от высоты волны.

Сопротивление движению судна увеличивается при ветре и волнении моря. В Северной Атлантике, при силе ветра до 6 баллов, это увеличение достигает в среднем 22-25%. При плавании на волнении амплитуды колебаний упора и момента на винте находятся в линейной зависимости от высоты волны [1]. Согласно [2] изменение упора и момента гребного винта при килевой качке происходит от 2% до 15% для упора и от 2% до 13% для момента гребного винта [3].

При резком увеличении сопротивления движению судна от ветра и волн, частота вращения коленчатого вала обычно не превышает 25-40% от номинальной, двигатель работает неустойчиво и может заглохнуть [4, 5, 6].

Постановка задачи

В связи с большим влиянием колебаний момента сопротивления на частоту вращения гребного винта представляется целесообразным рассмотреть процесс совместной работы главного двигателя и регулятора частоты вращения с различными моделируемыми настроечными параметрами. При этом возмущающим фактором возникновения переходного процесса будет являться синусоидальный момент сопротивления на валу двигателя. Кроме этого, необходимо рассмотреть работу двигателя и регулятора при скачкообразном изменении настройки с выбором оптимальных настроечных параметров регулятора.

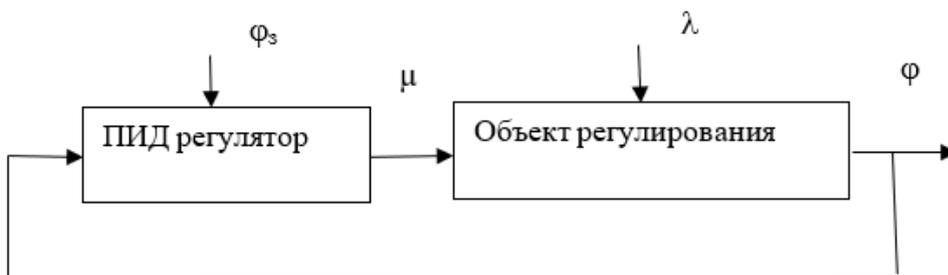


Рис. 2. Система автоматического регулирования частоты вращения главного двигателя

Уравнение объекта регулирования (рис. 2)

$$T_o \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_o \mu - k_\lambda \lambda, \quad (1)$$

уравнение регулятора частоты вращения (рис. 2)

$$T_p \frac{d\mu}{dt} + \mu = k_p \left[(\varphi_3 - \varphi) + \frac{1}{T_i} \int (\varphi_3 - \varphi) dt + T_d \frac{d(\varphi_3 - \varphi)}{dt} \right], \quad (2)$$

где φ – относительное отклонение частоты вращения; φ_3 – относительное отклонение задания частоты вращения;

μ – относительное отклонение регулирующего органа;

λ – относительное отклонение нагрузки на двигатель;

T_o, T_p – постоянные времени объекта регулирования и регулятора;

k_p, T_i, T_d – настроечные параметры регулятора (коэффициент усиления регулятора, время интегрирования, время дифференцирования).

Уравнение относительной нагрузки

$$\lambda = \lambda_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

где λ_m – максимальное значение синусоидальной нагрузки;

ω – циклическая частота, равная $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T – период колебаний;

t – время.

Примем $T_o=1$; $k_o=1$; $k_\lambda=1$; $T_p=0,5$ с;

настроечные параметры регулятора – изменяемые.

Необходимо исследовать влияние настроечных параметров на переходные характеристики при синусоидальном изменении нагрузки при максимальном изменении амплитуды на 10% и периоде колебаний нагрузки 17 с. Также необходимо исследовать влияние настроечных параметров на переходные характеристики при резком (скачкообразном) изменении настройки для выбранного уровня (на 10%).

Основная часть

Передаточная функция по нагрузке при неизменном задании на регулятор

$$W(p) = \frac{\varphi}{\lambda} = \frac{k_\lambda (T_p p + 1) T_i p}{T_o T_p T_i p^3 + (T_p T_i + T_o T_i + k_o k_p T_d T_i) p^2 + (T_i + k_o k_p T_i) p + k_o k_p} \quad (4)$$

Необходимо выяснить какие процессы (чисто аperiodические, аperiodические с мелкими колебаниями, чисто колебательные) будут наиболее подходящими для поддержания частоты вращения при вынужденных колебаниях момента сопротивления движению судна.

Используя диаграмму Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры регулятора, при которых координаты диаграммы попадут в зону аperiодических процессов [7, 8].

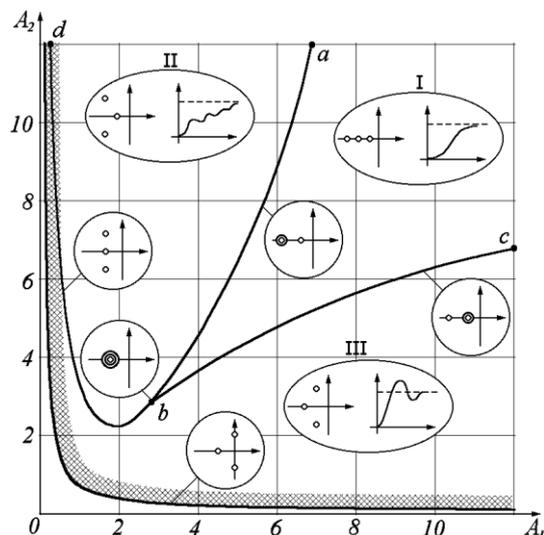


Рис. 3. Диаграмма Вышнеградского

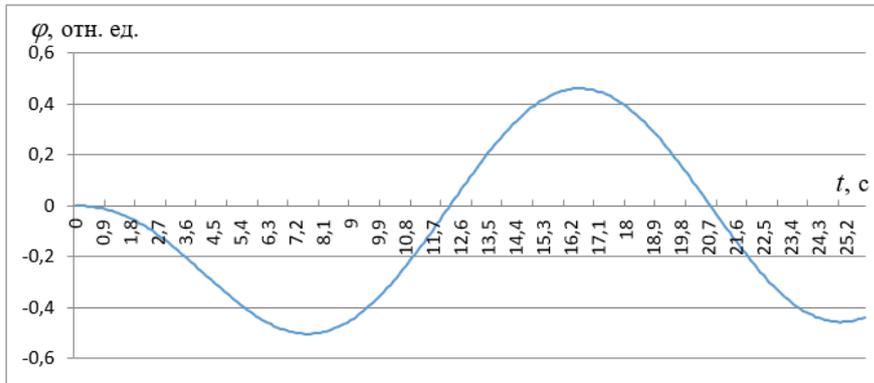
Для построения переходного процесса и расчёта значений координат Вышнеградского использована программа Microsoft Excel. Необходимые для расчёта данные занесены в таблицу 1 (п. 1).

Зависимости относительного отклонения регулируемой величины от времени и относительного отклонения регулирующего органа от времени представлены на рис. 4.

Используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения чисто отрицательных без мнимой части с помощью источника [11]. Переходный процесс на рис. 4 наблюдается с колебаниями с большим переуправлением (50% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как исходная волна.

По диаграмме Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры регулятора, при которых координаты диаграммы попадут в зону затухающих колебательных процессов (табл. 1, п. 2). Также используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения с отрицательной вещественной частью, из них два корня имеют комплексно сопряжённые мнимые части и меньшие по модулю вещественные части по сравнению с третьим корнем [11].

а)



б)

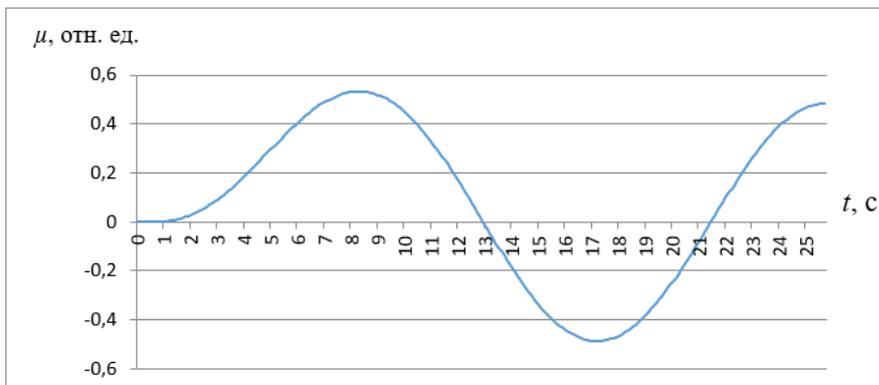


Рис. 4. Переходные процессы регулируемого параметра (а) и регулирующего органа (б) при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону аperiodических процессов

Анализируя переходный процесс на рис. 5, наблюдаем колебания с перерегулированием, меньшим, чем на рис. 4 (22% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как заданная волна.

Используя диаграмму Вышнеградского (рис. 3), выберем такие параметры, при которых координаты диаграммы попадут в зону затухающих аperiodических процессов с небольшими колебаниями (табл. 1, п. 3). Также используем передаточную функцию по нагрузке (4) и добиваемся значений корней характеристического уравнения с отрицательной вещественной частью, из них два корня имеют комплексно сопряжённые мнимые части и большие по модулю вещественные части по сравнению с третьим корнем [11].

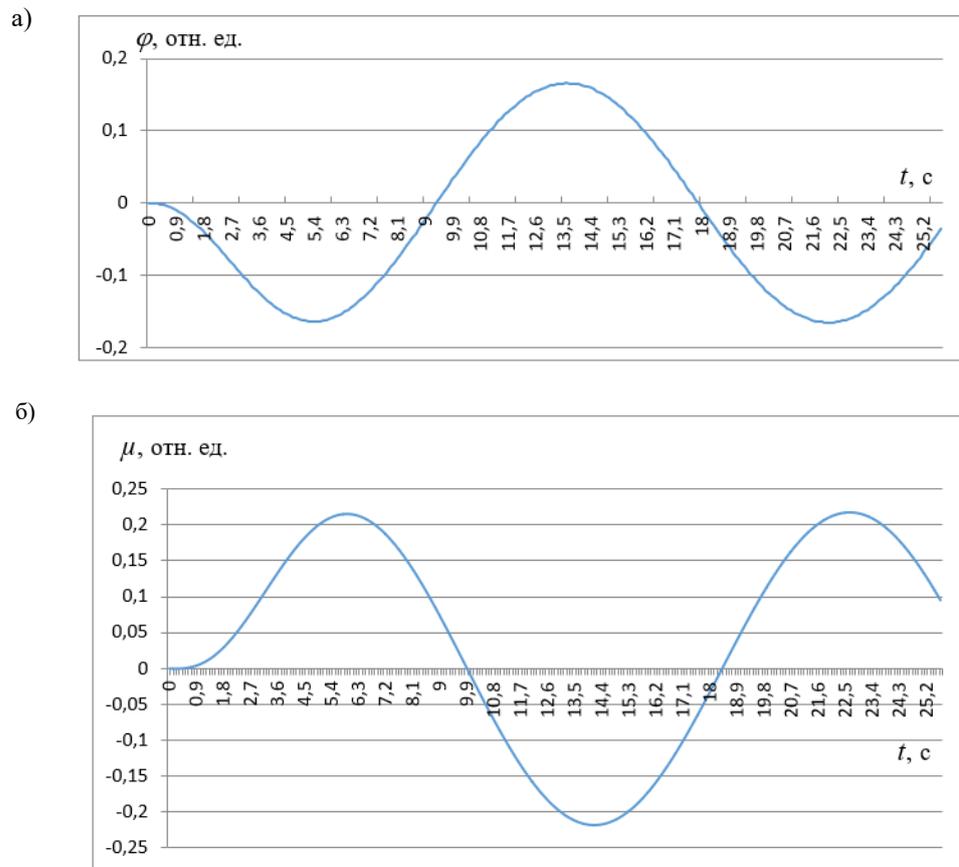
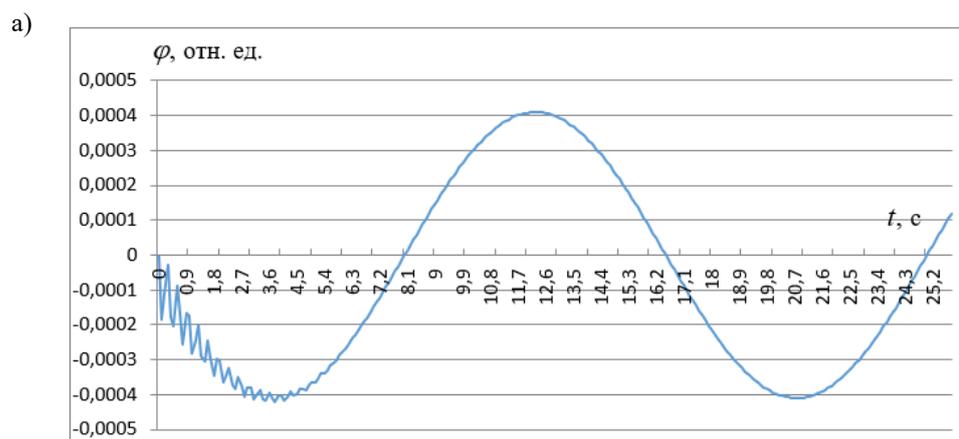


Рис. 5. Переходные процессы регулируемого параметра (а) и регулирующего органа (б) при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону колебательных процессов

Анализируя переходный процесс на рис. 5, наблюдаем колебания с перерегулированием, меньшим, чем на рис. 4 (0,04% заданной частоты вращения) и с периодом колебаний 17 с, таким же, как заданная волна.



б)

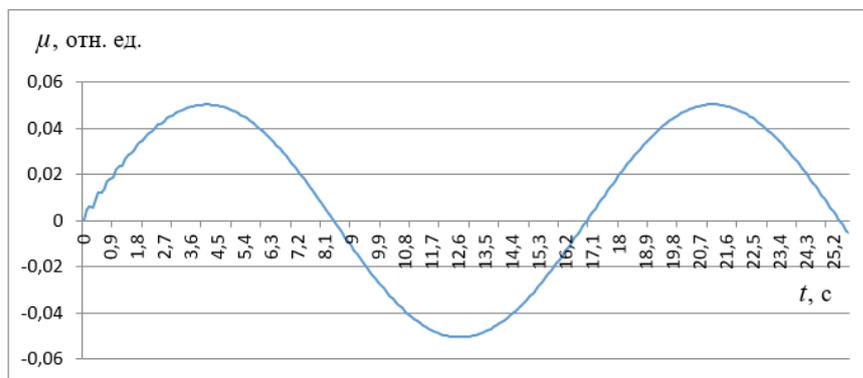
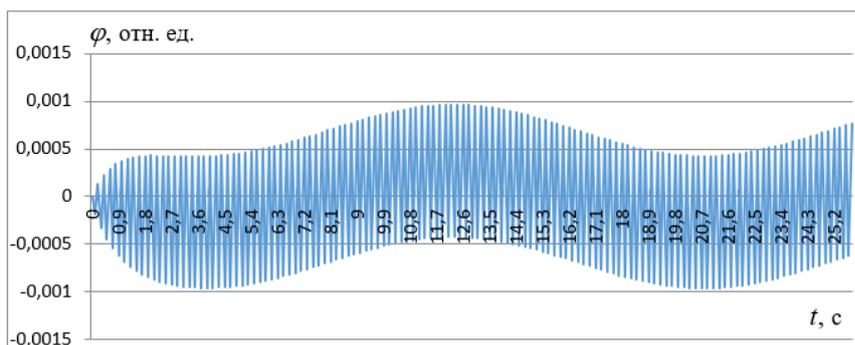


Рис. 6. Переходные процессы, при которых координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону процессов с небольшими колебаниями
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

С целью определения оптимальной настройки регулятора, воспользуемся эмпирическим методом настройки параметров ПИД-регулятора Зиглера-Никольса [9]. Для этого отключаем дифференциальную и интегральную составляющие закона регулирования и увеличиваем коэффициент усиления регулятора до появления незатухающих колебаний. Параметры представлены в таблице 1, п. 4.

Критический коэффициент усиления принят 189, критический период колебаний равен 2с, результаты расчета представлены на рис. 7.

а)



б)

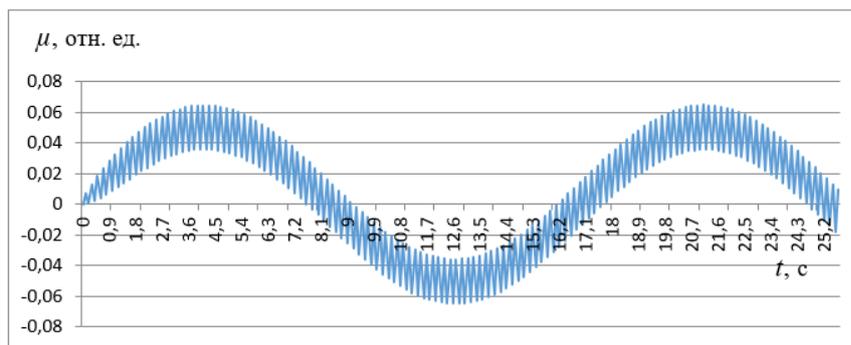


Рис. 7. Переходные процессы, при которых возникают незатухающие колебания регулируемого параметра
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

С целью сравнения П-регулятора с ПИД-регулятором, найдём коэффициент усиления, равный половине от критического и находим переходные процессы для регулируемого параметра и регулирующего органа. Параметры представлены в таблице 1, п. 5, а графики переходного процесса на рис. 8.

Заданы параметры для оптимизированного процесса по методу Зиглера-Никольса для ПИД-регулятора: $k_p = 0,6k_{кр}$; $T_i = 0,5T_{кр}$; $T_d = 0,125T_{кр}$. При таких параметрах получается неустойчивый процесс. Это может объясниться тем, что метод Зиглера-Никольса используется в основном для медленно протекающих процессов и не всегда даёт верный результат [9]. При уменьшении T_d в 10 раз – получаем устойчивый процесс (табл. 1, п. 6). Графики переходного процесса представлены на рис. 8.

Передаточная функция по заданию при неизменной нагрузке на двигатель имеет вид:

$$W(p) = \frac{\varphi}{\varphi_3} = \frac{k_p k_o (T_d T_i p^2 + T_i p + 1)}{(T_o T_p + k_o k_p T_d T_i) p^2 + (T_o + T_p + k_o k_p T_i) p + 1 + k_o k_p} \quad (5)$$

Параметры объекта и ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения [10] представлены в таблице 2, п.1.

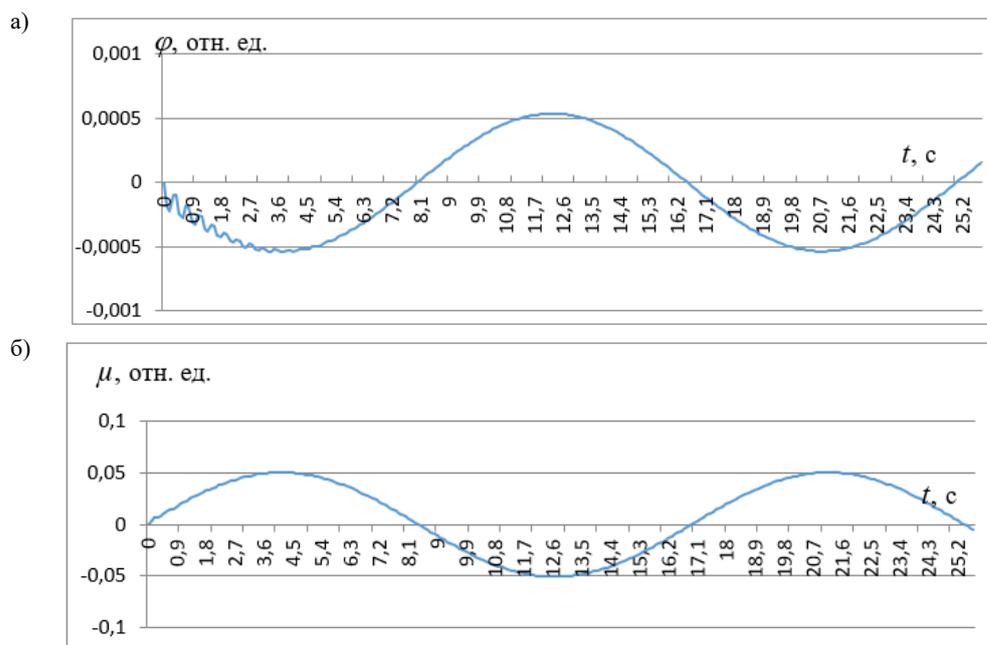


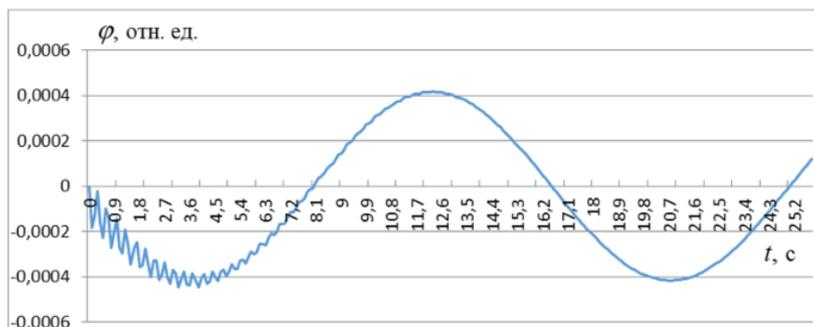
Рис. 8. Переходные процессы с оптимизированными параметрами П-регулятора, определёнными по методу Зиглера-Никольса а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Таблица 1

Параметры объекта и регулятора при изменении нагрузки

Параметры объекта регулирования			Параметры регулятора				Параметры колебаний синусоидальной нагрузки		Коэффициенты характеристического уравнения				Координаты диаграммы Вышнеградского	
T_o, c	k_o	k_λ	T_p, c	k_p	T_d, c	T_i, c	λ_m	T, c	a_0	a_1	a_2	a_3	A	B
1. Аperiodические процессы														
1	1	1	0,5	1	0,3	1,5	0,05	17	0,75	2,7	3	1	3,27	3,30
2. Колебательные процессы														
1	1	1	0,5	1	0,2	0,3	0,05	17	0,15	0,51	0,6	1	1,80	1,13
3. Аperiodические процессы с небольшими колебаниями														
1	1	1	0,5	113,4	0,0005	1	0,05	17	0,5	1,56	114,4	113,4	0,51	6,15
4. с параметрами регулятора на границе устойчивости														
1	1	1	0,5	189	0	∞	0,05	17	5×10^7	$1,5 \times 10^8$	$1,9 \times 10^{10}$	189	194,9	$1,6 \times 10^6$
5. Процессы с оптимизированными параметрами П-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса														
1	1	1	0,5	95,5	0	∞	0,05	17	5×10^7	$1,5 \times 10^8$	$1,9 \times 10^{10}$	189	194,9	$1,6 \times 10^6$
6. Процессы с оптимизированными параметрами ПИД-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса с корректировкой T_d														
1	1	1	0,5	113,4	0,025	1,2	0,05	17	0,6	2,14	137,28	113,4	0,621	6,947

а)



б)

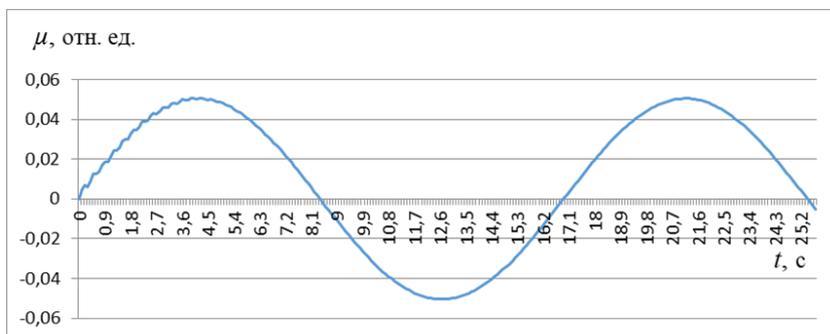


Рис. 9. Переходные процессы с оптимизированными параметрами ПИД-регулятора, определённые по методу Зиглера-Никольса с корректировкой T_d
 а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Графики переходных процессов регулируемого параметра и регулирующего органа при изменении задания для ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения приведены на рис. 10.

Таблица 2

Параметры объекта и регулятора при изменении задания

Постоянная времени и коэффициенты объекта регулирования			Постоянная времени и коэффициенты регулятора				Скачок заданного значения	Коэффициенты характеристического уравнения			Корни характеристического уравнения	
T_o, c	k_o	k_λ	T_p, c	k_p	T_d, c	T_i, c	φ_z	a_0	a_1	a_2	p_1	p_2
1. Переходные процессы при действительных корнях характеристического уравнения												
1	1	1	0,5	1	0,0005	1	0,1	0,50	2,5	2	-1,00	-3,99
2. Переходные процессы при комплексных корнях характеристического уравнения												
1	1	1	0,5	1	0,5	1	0,1	1	2,5	2	-1,25+ i1,32	-1,25- i1,32

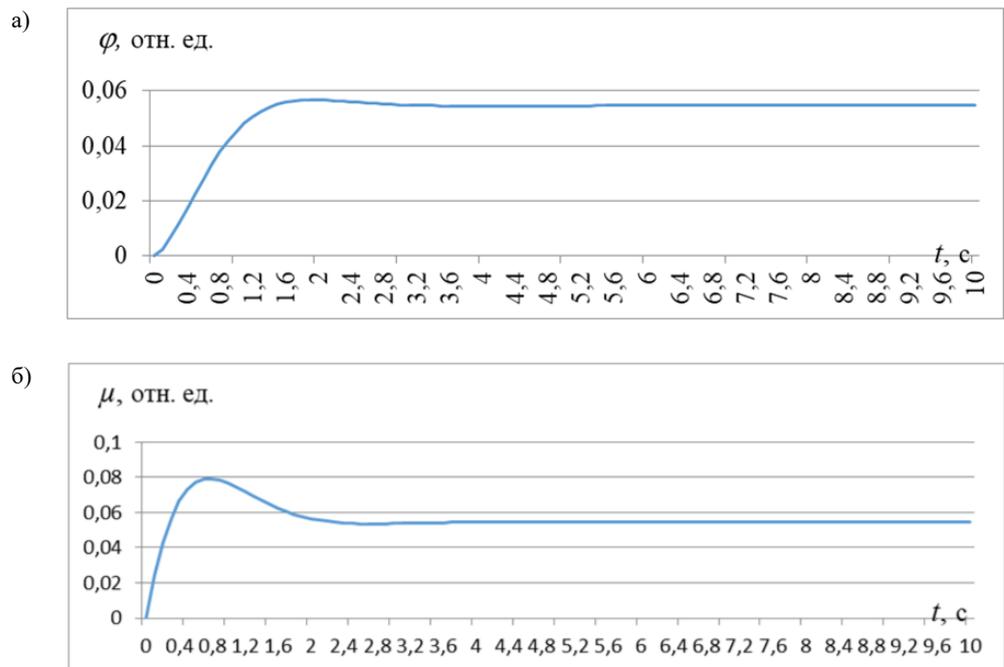


Рис. 10. Переходные процессы при изменении задания для ПИД-регулятора при действительных корнях характеристического уравнения а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

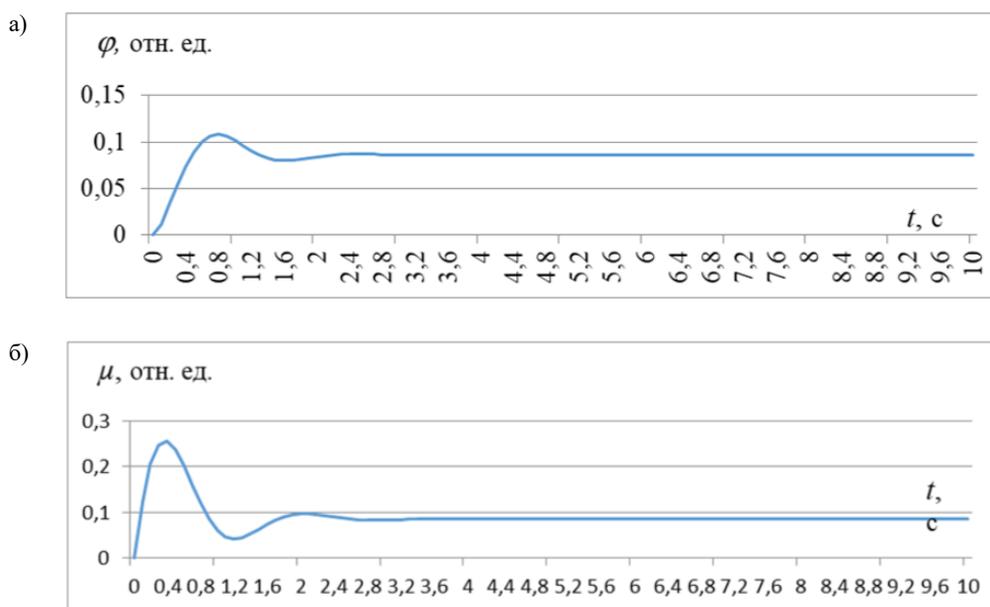


Рис. 11. Переходные процессы при изменении задания для ПИД-регулятора при комплексных корнях характеристического уравнения
а – регулируемого параметра, б – регулирующего органа

Выводы

Практическая значимость результатов:

1. При работе судна в условиях волнения с целью уменьшения забросов частоты вращения необходимо увеличивать коэффициент усиления регулятора и уменьшать время дифференцирования.

2. При изменении задания частоты вращения коэффициент усиления регулятора должен быть низким, а время дифференцирования немного увеличенным.

Наименьшая амплитуда колебаний регулируемого параметра (частоты вращения главного дизеля) при синусоидальных колебаниях нагрузки выходит при параметрах ПИД-регулятора, когда координаты диаграммы Вышнеградского попадают в зону аperiodических процессов с небольшими колебаниями (рис. 8).

При изменении задания для ПИД-регулятора, наименьшее время переходного процесса получается при комплексных корнях характеристического уравнения.

Кроме этого, при действительных корнях характеристического уравнения увеличивается расхождение между заданной и действительной величиной регулируемого параметра (рис. 9).

Список литературы

1. Панов Б.Н. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения, Керчь, изд. КГМТУ, 2020, 172 с.
2. Возницкий И.В. Техническая эксплуатация двигателей промышленных судов. М., изд. Пищевая промышленность, 1969, 368 с.
3. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 224 с.
4. Инструкция по эксплуатации двигателей 50-98 МС. Копенгаген: MANB&W. 1997. С. 40.

5. Кузьменко Г. В., Панасенко А. А. Дозировка цилиндрического масла в главных судовых крейцкопфных малооборотных двигателях: учеб. пособие. Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2010. 35 с.
6. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций. СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1997. 446 с.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003.
8. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Высш. шк., 2004. 365 с.
9. Настройка ПИД–регулятора по методу Циглера–Николса URL: <https://elektr.pprrel.ru/nastroyka-pid-regulyatora-po-metodu-tsiglera-nikolsa> (дата обращения: 20.11.2025).
10. Сырчина А.С., Кулешов А.В. Синтез регулятора индикаторного гиростабилизатора с использованием критерия Вышнеградского. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 11. С. 99-110.
11. Онлайн калькулятор кубических уравнений. https://calc-x.ru/online_cubic_equation_calculator.php (дата обращения: 20.11.2025).

References

1. Panov B.N. Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya [Hydrometeorological support of navigation], Kerch', izd. KGMTU, 2020, 172 p.
2. Vozniczkij I.V. Texnicheskaya e'kspluatatsiya dvigatelej promy'slovy'x sudov [Technical exploitation of fishing vessel engines]. M., izd. Pishhevaya promy'shennost', 1969, 368 p. (In Russ).
3. Kaczman F. M. E'kspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna [Exploitation of the propulsion system of a marine vessel]. M.: Transport, 1987. 224 p. (In Russ).
4. Instruktsiya po e'kspluatatsii dvigatelej 50-98 MS [Exploitation instructions for engines 50-98 MS]. Kopenhagen: MANB&W. 1997. 40 p.
5. Kuzmenko G. V., Panasenko A. A. Dozirovka cilindrovogo masla v glavny'x sudovy'x krejczkopfny'x malooborotny'x dvigatelyax [Dosage of cylinder oil in main marine low-speed crosshead engines]: ucheb.posobie. Vladivostok: Mor.gos. un-t im. adm. G. I. Nevel'skogo, 2010. 35 p. (In Russ).
6. Pravila texnicheskoj e'kspluatatsii sudovy'x texnicheskix sredstv i konstrukcij [Rules of technical exploitation of ship's equipment and structures]. SPb.: ZAO CNIIMF, 1997. 446 p. (In Russ).
7. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. – izd. 4-е, pererab. i dop. – SPb.: Izd-vo «Professiya», 2003. (In Russ).
8. Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic regulation]. – M.: Vy'ssh. shk., 2004. 365 p. (In Russ).
9. Nastrojka PID–regulyatora po metodu Ciglera–Nikolsa [Adjusting the PID controller using the Ziegler–Nichols method] URL: <https://elektr.pprrel.ru/nastroyka-pid-regulyatora-po-metodu-tsiglera-nikolsa>. (In Russ).
10. Sy'rchina A.S., Kuleshov A.V. Sintez regulyatora indikatornogo girostabilizatora s ispol'zovaniem kriteriya Vy'shnegradskogo [Synthesis of the indicator gyrostabilizer regulator using the Vyshnegradsky criterion]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2022. № 11. p.p. 99-110.
11. Online Cubic Equation Calculator https://calc-x.ru/online_cubic_equation_calculator.php (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Панасенко Андрей Александрович, к.т.н.,
доцент, доцент кафедры эксплуатации
автоматизированных судовых энергетических
установок, МГУ им. адм. Г.И. Невельского,
ул. Верхнепортовая, д. 50а, г. Владивосток,
Россия, 690003, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

Andrey A. Panasenko, PhD in Engineering
Science, Associate Professor of Ship's Power
Plants Automation Department, Maritime State
University named after admiral G.I. Nevelskoi,
690003, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok,
Russia, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

Петрашёв Сергей Владимирович, к.т.н.,
доцент, доцент кафедры теории и устройства
судна, МГУ им. адм. Г.И. Невельского. ул.
Верхнепортовая, д. 50а, г. Владивосток, Россия,
690003, e-mail: petrashov@msun.ru

Sergey V. Petrashev, PhD in Engineering
Science, Associate Professor of the Theory and
Vessel Construction Department, Maritime State
University named after admiral G.I. Nevelskoi.
690003, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok,
Russia, e-mail: petrashov@msun.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; принята к публикации 05.02.2026;
опубликована онлайн 20.03.2026. Received 18.12.2025; published online 20.03.2026.