

УДК 621.431.74

ARTICLE HISTORY

Received 10.12.2022

Accepted 26.12.2022

Горб Сергій Іванович<sup>1</sup>, Поповський Олексій Юрійович<sup>2</sup>,  
Будуров Микола Ігорович<sup>3</sup>  
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна  
gs@fa.onma.edu.ua<sup>1</sup>, alexejpopovskij57@gmail.com<sup>2</sup>,  
budurovuk@gmail.com<sup>3</sup>

## Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора

Gorb Sergii<sup>1</sup>, Alexey Popovskii<sup>2</sup>, Budurov Mykola<sup>3</sup>  
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
gs@fa.onma.edu.ua<sup>1</sup>, alexejpopovskij57@gmail.com<sup>2</sup>,  
budurovuk@gmail.com<sup>3</sup>

## Optimization of speed governor settings for diesel-generator

*Резюме – Обґрунтовано модель для аналізу динаміки системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) дизель-генератора (ДГ) під час ступінчастих змін навантаження. Показано, що через нелінійність ізодромний регулятор частоти обертання (РЧО) по-різному реагує на обурення різної величини. У зв'язку з цим розроблено рекомендації щодо вибору параметрів налаштування ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш імовірних режимах експлуатації.*

*Abstract – The model for analyzing the dynamics of the automatic speed control system (ASCS) of the diesel generator (DG) during stepped load changes is substantiated. It is shown that due to nonlinearity, the isodromic speed governor (SG) reacts differently to disturbances of different magnitudes. In this regard, recommendations for choosing the setting parameters of the isodromic SG as part of a diesel generator set on the most likely operating modes are developed.*

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-03-16

Суднові допоміжні двигуни експлуатуються в умовах ступінчастих змін навантаження внаслідок включення/вимкнення судових

механізмів, що викликає коливання частоти обертання. Оскільки коливання частоти обертання супроводжуються коливаннями параметрів електричного струму, що виробляється, і в разі паралельної роботи двигунів – обмінними коливанням потужності [1], РЧО повинні на експлуатаційних режимах мінімізувати відхилення частоти обертання від заданого значення. Однак традиційно параметри налаштування РЧО вибираються з умови оптимізації динаміки системи автоматичного регулювання при максимально допустимих ступінчастих змінах навантаження, наприклад, під час скидання 100 % навантаження. Частково це пояснюється тим, що стандартами регламентується відхилення і час регулювання частоти обертання при максимально допустимому ступінчастому скиданні навантаження [2]. При цьому не враховується, що ізодромні РЧО є нелінійними об'єктами [3] та їхня реакція на ймовірні в експлуатації збурення може відрізнятись від реакції при максимальному скиданні навантаження. Це означає, що налаштування заводом-виробником РЧО може відрізнятись від оптимального для експлуатаційних режимів роботи ДГ.

У зв'язку з викладеним поставлена задача розробити рекомендації щодо покращення роботи ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш імовірних режимах експлуатації (за умови дотримання вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження).

Як об'єкт дослідження обрано дизель-генераторну установку фірми Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61 великотоннажного нафтового танкера "KORO SEA", який побудований на верфі Namura Ship Building в Японії та введений в експлуатацію 27.02.2008. Основні технічні характеристики ДГ взяті з конструкторської документації [4] та наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ДГ Yanmar 6N18AL-UV

Кількість циліндрів	6
Діаметр циліндра, мм	180
Хід поршня, мм	280
Номинальна потужність, кВт	500
Номинальна частота обертання, хв <sup>-1</sup>	900
Середній індикаторний тиск, кгс/см <sup>2</sup>	17,5
Максимальний тиск згоряння, кгс/см <sup>2</sup>	180

У досліджуваній САРЧ ізодромний РЧО має дві суттєві нелінійності. Перша пов'язана з тим, що розхід мастила через голку ізодрому змінюється у степеневій залежності від перепаду тисків. А цей перепад під час зміни величини збурюючого сигналу може змінюватися в кілька разів [5], у той час як перепади тисків на вікнах золотника і дросельному отворі порожнини пояска ізодрому змінюються незначно. Зміна перепаду тиску призводить до зміни часу ізодрому. Друга пов'язана з навмисним перекриттям у вікнах золотника, який запобігає реакції регулятора на збурення, викликані циклічною роботою дизеля [6] і скручуванням розподільного валу під час набігання штовхачів паливних насосів на кулачки. Через нелінійності ізодромний РЧО по різному реагує на збурення різної величини.

Принципова схема ізодромного РЧО фірми Yanmar типу NZ61 [7] представлена на рис. 1.

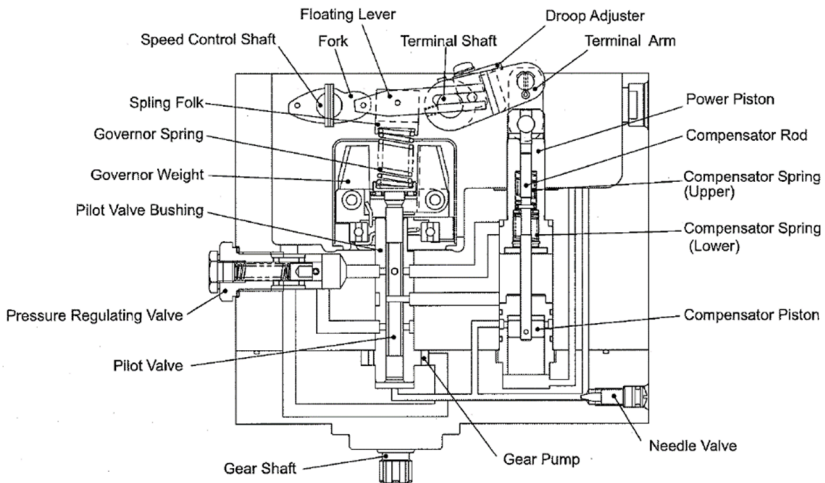


Рис. 1. Принципова схема ізодромного РЧО Yanmar NZ61

Ізодромний зворотний зв'язок (ЗЗ) регулятора вміщує верхню та нижню пружини і поршень ізодрому, які пов'язані з силовим поршнем, а також регульований дросель. Крім цього, корпус поршня ізодрому з'єднаний маслопроводом із нижнім корпусом керуючого золотника, а через регульований дросель масло перепускається в маслозбірник.

Дослідження виконане з використанням моделі САРЧ [8], згідно з якою обертальний момент дизеля у відносних змінних визначається як:

$$\overline{M}_d = \frac{1}{\eta_{m0}} [\overline{M}_i - (1 - \eta_{m0})(0,19 + 0,14\overline{M}_i + 0,67\overline{\omega}_d)], \quad (1)$$

де  $\eta_{m0}$  – механічний ККД дизеля на номінальному режимі;  $\overline{M}_i$  – відносний індикаторний момент дизеля;  $\overline{\omega}_d$  – відносна кутова швидкість валу.

Індикаторний момент дизеля вважається пропорційним до зміни подачі палива ( $\overline{M}_i = \overline{h}_p$ ). Однак у зв'язку з циклічністю роботи дизеля операція присвоєння значення  $\overline{h}_p$  змінній  $\overline{M}_i$  виконується через проміжки часу  $\Delta\tau$  (с), що відповідають повороту кривошипа на кут між послідовними впорскуваннями в циліндри дизеля:

$$\Delta\tau = \frac{\varphi_{\Pi}}{in_{d0} \overline{\omega}_{d0} \cdot 60}, \quad (2)$$

де  $\varphi_{\Pi}$  – кут повороту кривошипа за цикл, град;  $i$  – кількість циліндрів дизеля;  $n_{d0}$  – частота обертання валу на номінальному режимі,  $\text{хв}^{-1}$ .

У дизелях характерно запізнення зміни  $\overline{M}_i$  за відношенням до зміни подачі палива  $\overline{h}_p$ :

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{20 - 10\overline{h}_p}{6n_{d0} \overline{\omega}_d}. \quad (3)$$

Урахування циклічності роботи дизеля за виразом (2) і запізнення за виразом (3) найбільш доцільно при малих частотах обертання дизелів. У досліджуваному середньоберттовому дизелі з частотою обертання 900  $\text{хв}^{-1}$  величини  $\Delta\tau$  і  $\tau_{\text{зап}}$  відносно малі: порядку 0,002 с кожна. Це означає, що цими нелінійностями можна знехтувати.

Нечутливість регулятора, пов'язана з перекриттям вікон золотника, має алгоритм перетворення сигналу:

$$\overline{z}_m = \begin{cases} \overline{z}_3 - \frac{\varepsilon}{2} & \text{при } \overline{z}_3 > \frac{\varepsilon}{2}; \\ \overline{z}_3 + \frac{\varepsilon}{2} & \text{при } \overline{z}_3 < -\frac{\varepsilon}{2}; \\ 0 & \text{при } |\overline{z}_3| \leq \frac{\varepsilon}{2}, \end{cases}$$

де  $\varepsilon$  – відносна зона нечутливості золотника.

Відносна зміна подачі палива пов'язана з вихідним сигналом регулятора співвідношенням:

$$\bar{h}_p' = \frac{\bar{z}_c}{k_{в.х}},$$

де  $k_{в.х}$  – відносна величина використання ходу регулятора під час переходу від нульової подачі палива до номінальної.

Розрахунковий вираз ізодромного ЗЗ має вигляд:

$$\frac{d\bar{\xi}_1}{dt} = k_i \frac{d\bar{z}_c}{dt} - \text{sign}(\bar{\xi}_1) \frac{\sqrt{|\bar{\xi}_1|}}{T_i^*}, \quad (4)$$

де  $\bar{\xi}_1$  – відносний вихідний сигнал ізодромного ЗЗ;  $\bar{z}_c$  – відносний сигнал ходу силового сервомотора;  $k_i$  – коефіцієнт передачі ізодромного ЗЗ;  $T_i^*$  – час ізодромного ЗЗ.

Структурна схема САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV з РЧО Yanmar NZ61 приведена на рис. 2.

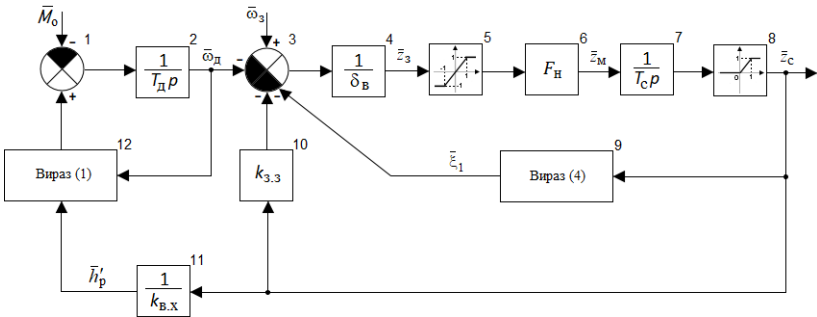


Рис. 2. Структурна схема САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV

Структурна схема містить: 1, 3 – суматори; 2, 7 – інтегруючі ланки; 4, 10 – пропорційні ланки; 5 і 8 – нелінійні ланки, які враховують насичення сигналу на рівні  $\pm 1$  в діапазоні  $0 \dots 1$  відповідно; 6 – функціональний перетворювач, який вводить зону нечутливості, пов'язану з перекриттям вікон золотника; 9 – нелінійний ізодромний ЗЗ; 11 – ланка, яка враховує співвідношення ходу рейки

паливних насосів і силового поршня регулятора; 12 – ланка, яка враховує обертальний момент дизеля.

Модель САРЧ суднового дизеля Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61 приведена на рис. 3.

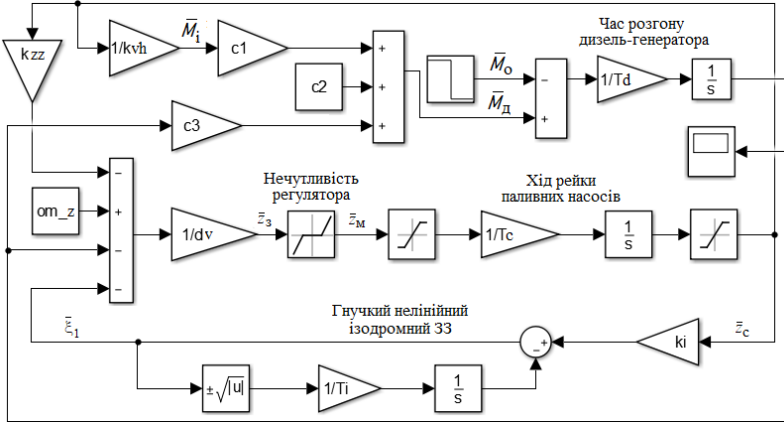


Рис. 3. Модель САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61

У моделі використовувалися наступні значення: початковий  $M_{o1}$  і кінцевий  $M_{o2}$  відносні моменти навантаження 0...1 відн. од.; відносна частота обертання на початковому режимі  $\bar{\omega}_d = 1 + (1 - M_{o1})k$ , де  $k = 0,044$  відн. од. – кутовий коефіцієнт навантажувальної характеристики; час розгону ДГ  $T_d = 1,8$  с; відносна величина зони нечутливості регулятора  $\varepsilon = 0,002$  відн. од.; нерівномірність вимірювача частоти обертання  $\delta_B = 0,08$  відн. од.; коефіцієнт передачі ізодромного ЗЗ  $k_i = 0,05 \dots 0,5$  с<sup>-1</sup>; час ізодромного ЗЗ  $T_i^* = 0,1 \dots 3$  с; час силового сервомотора РЧО  $T_c = 0,36$  с; коефіцієнт використання ходу регулятора під час переходу від нульової до номінальної подачі палива  $k_{в,х} = 0,75$  відн. од.; коефіцієнт передачі жорсткого ЗЗ  $k_{3,3} = 0,067$  відн. од.; механічний

ККД ДГ  $\eta_{M0} = 0,87$  відн. од.; кут повороту кривошипа за цикл  $\varphi_{ц} = 4\pi$ ; число циліндрів двигуна  $i = 6$ ; частота обертання валу на номінальному режимі  $n_{д0} = 900$  хв<sup>-1</sup>;  $c_1 = (1 - 0,14(1 - \eta_{M0})) / \eta_{M0}$ ;  $c_2 = -0,19(1 - \eta_{M0}) / \eta_{M0}$ ;  $c_3 = -0,67(1 - \eta_{M0}) / \eta_{M0}$ ; початкове положення штока керуючого силового гідроциліндра  $z_c = (1 - c_3 \bar{\omega}_d - c_2) k_{в.х} / c_1$ ; відносний сигнал завдання  $\bar{\omega}_3 = \bar{\omega}_d + k_{3,3} z_c$ .

У дослідженні під "оптимальним" налаштуванням РЧО розумілося таке, що забезпечує мінімум закидання регульованої величини з дотриманням дозволеного стандартами часу регулювання частоти обертання. Моделюванням встановлено, що для різних величин скидання навантаження оптимальні налаштування ізодромного ЗЗ РЧО істотно різняться (табл. 2).

Таблиця 2

Оптимальні налаштування ізодромного ЗЗ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 %

$\Delta M_c, \%$	$k_i, c^{-1}$	$T_i, c$
10	0,044	0,288
20	0,046	0,292
30	0,056	0,312
40	0,074	0,348
50	0,100	0,400
60	0,134	0,468
70	0,176	0,552
80	0,226	0,652
90	0,284	0,768

На рис. 4 наведено перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із кроком 10 % та оптимальних налаштуваннях ізодромного ЗЗ із табл. 2.

Для порівняння на рис. 5 – 7 наведено перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із кроком 10 %:

рис. 5 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 10 % скидання;

рис. 6 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 50 % скидання;

рис. 7 – під час скидання навантаження зберігаються налаштування ізодромного ЗЗ, оптимальні для режиму 90 % скидання.

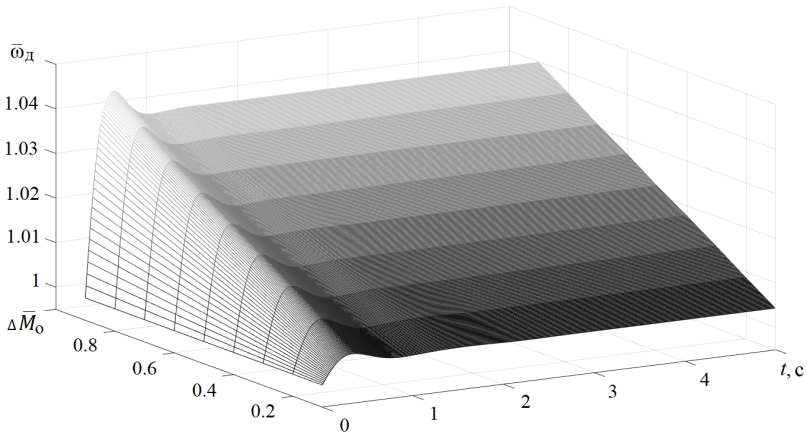


Рис. 4. Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % з оптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ для кожного режиму

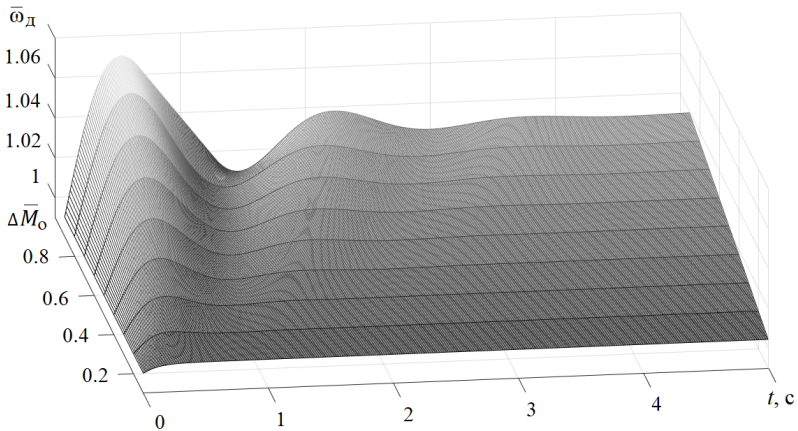


Рис. 5. Перехідні процеси в САРЧ при скиданні навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ( $k_i = 0,044 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_i = 0,29 \text{ c}$ )



Рис. 5 – 7 підтверджують, що для різних величин скидання навантаження оптимальність забезпечується при різному налаштуванні ізодромного ЗЗ. Однак в експлуатації відсутня можливість переналаштовування ізодромного ЗЗ залежно від експлуатаційного режиму роботи судна. Тому пропонується використовувати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ РЧО, яке визначається для найбільш імовірних в експлуатації істотних величин скидання/накидання навантажень.

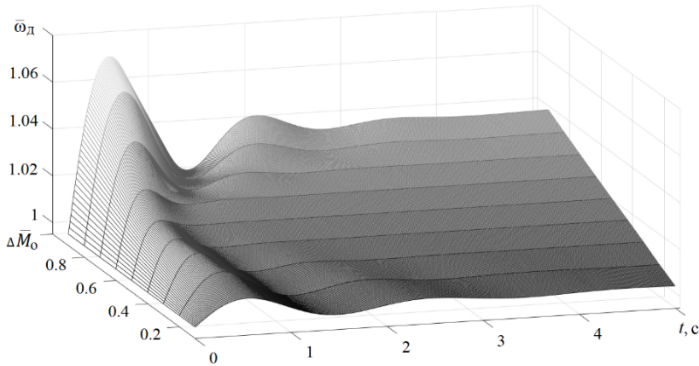


Рис. 6. Перехідні процеси в САРЧ при скиданні навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ( $k_i = 0,1 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_i = 0,4 \text{ c}$ )

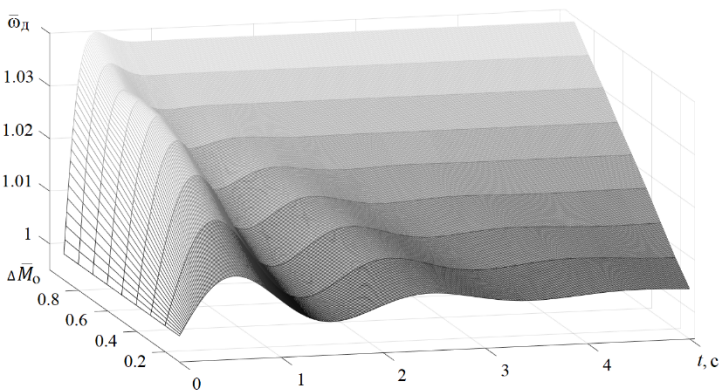


Рис. 7. Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із налаштуванням ізодромного ЗЗ ( $k_i = 0,284 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_i = 0,768 \text{ c}$ )

Аналіз потужностей споживачів танкера "KORO SEA", а також їхнє відношення до потужності дизель-генераторів (з урахуванням їхньої кількості в роботі на різних експлуатаційних режимах та ймовірності включення) показав, що в експлуатації САРЧ має забезпечити необхідну динаміку в широкому діапазоні скидання/накидання навантаження. Найбільші величини скидання/накидання навантаження (при включенні/вимкненні споживачів потужністю понад 30 кВт) склали:

- нормальний ходовий режим судна – 25 ... 50 %;
- очищення вантажних танків на ходу судна – 20 ... 55 %;
- обігрів вантажу на ходу судна – 10 ... 30 %;
- під час заходу/виходу судна в/із порт(у) – 25 ... 60 %;
- під час вантажних операціях – 25 ... 75 %;
- у порту – 20 ... 40 %.

Найбільш імовірною в експлуатації істотною величиною скидання/накидання навантаження для досліджуваного судна визнано 20 – 25 %. Для такого скидання/накидання навантаження субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ склало:  $k_i = 0,05 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_i = 0,3 \text{ с}$ . На рис. 8 показані перехідні процеси в САРЧ суднового ДГ Yanmar 6N18AL-UV із регулятором Yanmar NZ61 під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ. Це налаштування практично зберігає закидання частоти обертання, показане на рис. 4 під час скидання 10 % навантаження. Якщо порівнювати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ із оптимальним для скидання 90 % навантаження (останнє найбільш імовірне, як рекомендоване конструкторською документацією), то воно забезпечує на найбільш імовірних режимах експлуатації ДГ зменшення закидання частоти обертання на 0,02 відн. од.

Таким чином показано, що навіть правильне налаштування заводом-виробником ізодромних РЧО суднових ДГ через нелінійності РЧО може не забезпечити їхню оптимальну роботу на найбільш імовірних експлуатаційних режимах. Із метою покращення динамічних характеристик РЧО в експлуатації запропоновано методологію вибору параметрів налаштування ізодромного ЗЗ, яка апробована на судновій дизель-генераторній установці Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61.

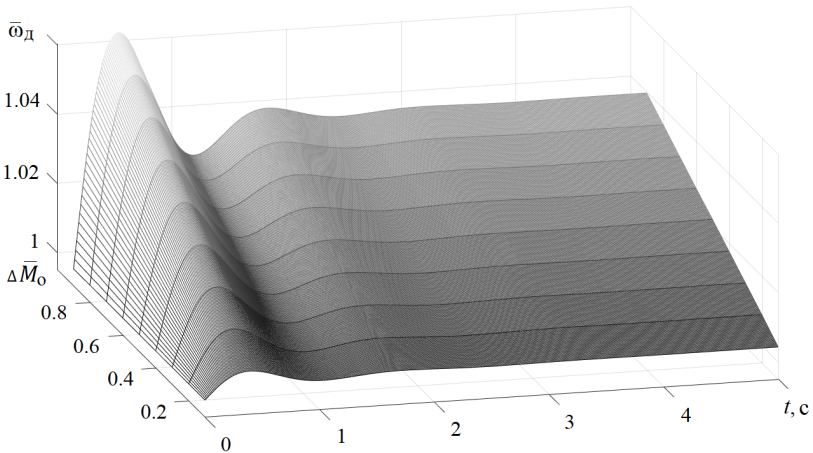


Рис. 8. Перехідні процеси в САРЧ при скиданнях навантаження в діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ ( $k_i = 0,05 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_i = 0,3 \text{ c}$ )

Подальше дослідження планується у напрямку оцінки доцільності автоматизації зміни параметрів налаштування РЧО залежно від фактичних скидань / накидань навантаження на дизель в експлуатації.

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С.И. Моделирование судовых дизельных установок и систем управления: учебное пособие. – М.: Транспорт, 1993. – 134 с.
2. Rules for classification: Ships – DNV (July, 2022). Retrieved from <https://standards.dnv.com/>
3. Planakis N, Karystinos V, Papalambrou G, Kyrtatos N. Transient Energy Management Controller for Hybrid Diesel-Electric Marine Propulsion Plants using Nonlinear MPC. // *IFAC-PapersOnLine*, 53 (2), 2020. – P. 14710 – 14715.
4. Shop Test Result for Main Diesel Generator Engine 6N18AL-UV, I.B.C. No. B6-0046501. – 2007. – 38 p.
5. Горб С.И. Оптимизация параметров гидромеханического регулятора частоты вращения. // *Двигателестроение*. – 1988. – №12. – С. 39 – 41.

6. Горб С.И., Бурденко А.Ф. Усовершенствованный метод оптимизации гидромеханических регуляторов частоты вращения главных двигателей. //Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2000. – Вып. 5. – Одесса: ОГМА. – С. 28 – 32.

7. Service Manual for NZ61 / NZ115 Series Hydraulic Governor, I.B.C. No. 0BNZ6-G00100. – 2008. – 47 p.

8. Горб С.И. Анализ систем автоматического регулирования частоты вращения судовых дизельных установок: учебное пособие. – М.: В/О "Мортехинформреклама", 1989. – 44 с.

*Анотація – Традиційно параметри налаштування РЧО вибираються з умови оптимізації динаміки системи автоматичного регулювання при максимально допустимій ступінчастій зміні навантаження. У свою чергу, ізодромні РЧО є нелінійними об'єктами та їхні реакції на ймовірні в експлуатації збурення можуть відрізнятися від реакції під час максимального скидання навантаження. Це означає, що налаштування РЧО заводом-виробником може відрізнятися від оптимального для експлуатаційних режимів роботи. У зв'язку з цим поставлено завдання розробити рекомендації щодо покращення роботи ізодромного РЧО у складі дизель-генераторної установки на найбільш ймовірних режимах експлуатації (за умови дотримання вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження).*

*Перехідні процеси в САРЧ під час скидання навантаження в діапазоні 10 ... 90 % підтверджують, що для різних величин скидання навантаження оптимальність забезпечується при різному налаштуванні ізодромного ЗЗ. Однак в експлуатації відсутня можливість переналаштування ізодромного ЗЗ залежно від експлуатаційного режиму роботи судна. Тому пропонується використовувати субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ РЧО, яке визначається для найбільш ймовірних в експлуатації істотних величин скидання/накидання навантажень. Аналіз потужностей споживачів танкера "KORO SEA", а також їхнє відношення до потужності дизель-генераторів (з урахуванням їхньої кількості в роботі на різних експлуатаційних режимах та ймовірності включення) показав, що найбільш ймовірною в експлуатації істотною величиною скидання/накидання навантаження є 20 – 25 %. Для такого скидання/накидання навантаження субоптимальне налаштування ізодромного ЗЗ склало:  $k_i = 0,05 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_i = 0,3 \text{ с}$ . Отримані перехідні*

процеси в САРЧ у діапазоні 10 ... 90 % із субоптимальним налаштуванням ізодромного ЗЗ показали, що це налаштування забезпечує на найбільш імовірних режимах експлуатації ДГ зменшення закидання частоти обертання на 0,02 відн. од. у порівнянні з оптимальним для скидання 90 % навантаження. А також практично зберігає закидання частоти обертання при оптимальному налаштуванні для скидання 10 % навантаження. Таким чином показано, що навіть правильне налаштування заводом-виробником ізодромних РЧО судових ДГ через нелінійності РЧО може не забезпечити їхню оптимальну роботу на найбільш імовірних експлуатаційних режимах. Із метою покращення динамічних характеристик РЧО в експлуатації запропоновано методологію вибору параметрів налаштування ізодромного ЗЗ, яка апробована на судовій дизель-генераторній установці Yanmar 6N18AL-UV з ізодромним регулятором Yanmar NZ61.

*Annotation – Traditionally, the SG tuning parameters are selected from the condition of optimizing the dynamics of the automatic control system with the maximum allowable load step change. In turn, isodromic SGs are non-linear objects and their response to possible disturbances in operation may differ from the response at maximum load shedding. This means that the SG factory setting may not be optimal for operating conditions. In this regard, the task was set to develop recommendations for improving the operation of the isodromic SG as part of a diesel generator set in the most likely operating modes (provided compliance with the requirements for speed regulation during the maximum permissible load shedding).*

*Transient processes in the ASCS during load shedding in the range of 10 ... 90 % confirm that for different values of load shedding, optimality is ensured with different settings of the isodromic feedback. However, in operation, there is no possibility of reconfiguring the isodromic feedback depending on the operating mode. Therefore, it is suggested to use the suboptimal setting of the isodromic feedback, which is determined for the most likely in operation significant values of load shedding/ surge. An analysis of the capacities of the consumers of the tanker "KORO SEA", as well as their relationship to the diesel generators power (taking into account their number in operation at different operating modes and the probability of inclusion) showed that the most probable in operation and significant value of load shedding/load surge is 20 – 25 %. For such load shedding / surge, the suboptimal setting of the isodromic feedback:  $k_i = 0,05 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_i = 0,3 \text{ s}$ . The obtained transient processes in the ASCS in the range of 10 ... 90 % with a suboptimal setting of the isodromic feedback showed that*

*this setting provides, in the most likely modes of DG operation, a reduction in the rotation frequency by 0,02 rel. un. compared to the optimal setting for 90 % load shedding. As well as practically preserves the rotational frequency overshoot at the optimal setting for 10 % load shedding. Thus, it is shown that even the correct setting by the manufacturer of the isodromic SG of marine DG due to the nonlinearities of the SG may not ensure their optimal operation in the most probable operating modes. In order to improve the dynamic characteristics of the SG in operation, a methodology for selecting the parameters of setting the isodromic feedback is proposed, which was tested on the Yanmar 6N18AL-UV marine diesel generator set with the Yanmar NZ61 isodromic regulator.*