

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-03-12

ARTICLE HISTORY

Received 11.03.2026

Accepted 07.04.2026

Будуров Микола Ігорович
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
budurovuk@gmail.com

Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизель-генератора

Budurov Mykola
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
budurovuk@gmail.com

Optimization of Electronic Speed Governor Settings for Marine Diesel Generator

Резюме. Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання контролерного типу суднового дизель-генератора, яка враховує істотність зміни навантаження при найімовірніших ступеневих збуреннях. Виявлено закономірності впливу параметрів налаштування електронного регулятора на показники роботи суднової дизель-генераторної установки в умовах експлуатації. За рахунок оптимізації налаштування покращена стабільність частоти обертання дизель-генератора без порушення регламентованих стандартами вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження.

Summary. A methodology for tuning a controller-based electronic speed governor of a marine diesel generator has been substantiated, taking into account the significance of load variations under the most probable step disturbances. The relationships between the governor tuning parameters and the performance indicators of the marine diesel generator set under operating conditions have been established. Optimization of the governor settings improves diesel generator speed stability while maintaining

compliance with standard requirements for speed control during maximum permissible load shedding.

Дизель-генератори (ДГ) використовуються у складі енергетичних установок більшості суден та мають прогнозовану довгострокову перспективу [1]. Останніми роками у системах автоматичного регулювання допоміжних дизелів широкого поширення набули електронні регулятори частоти обертання (РЧО), побудовані на базі програмованих логічних контролерів. Водночас у процесі експлуатації ДГ із такими РЧО часто виникають проблеми забезпечення якості регулювання частоти обертання, пов'язані з незадовільною динамікою регулятора під час зміни навантаження на ДГ. У результаті знижується стабільність частоти обертання ДГ на різних режимах роботи судна, що безпосередньо впливає на безпеку мореплавства. Нижче наведено характерні експлуатаційні випадки.

У 2021 – 2022 роках при експлуатації танкерів "NOBLEWAY", "BRIGHTWAY" та "FAIRWAY", обладнаних допоміжними дизельними установками HYUNDAI-HIMSEN 5H21/32, зафіксовано коливання параметрів електричного струму та обмінні коливання потужності при паралельній роботі ДГ, що призводило до їх самовільного від'єднання від суднової електромережі. Встановлено, що зазначені явища зумовлені некоректними налаштуваннями РЧО, які призводили до появи автоколивань у системі автоматичного регулювання частоти обертання (CAPЧ).

У період 2022 – 2023 років у процесі експлуатації танкерів "CATALAN SEA" та "LIGURIAN SEA" із допоміжними дизелями HYUNDAI-HIMSEN 7H17/28 виявлена незадовільна ефективність автоматичного регулювання частоти обертання у широкому діапазоні швидкісних режимів, що потребувало частого переналаштування регуляторів.

У 2023 – 2024 роках під час експлуатації танкерів "PACIFIC DIAMOND" та "PACIFIC QUARTZ" із ДГ DAIHATSU 6DK-20, а також танкерів "PACIFIC BLUE" та "PACIFIC JADE" із ДГ YANMAR 6EY22ALW, налаштування регуляторів не забезпечували задовільної реакції під час вмикання/вимкнення споживачів великої потужності, що призводило до зниження стабільності частоти обертання та, у ряді випадків, до відключення дизель-генераторних установок від суднової електромережі.

У період 2024 – 2025 років на танкерах "ATLANTIC EMERALD" та "ATLANTIC JADE" із ДГ HYUNDAI-HIMSEN 6H22CDF, а також на танкерах "ATLANTIC BLUE" та "ATLANTIC GOLD" із ДГ DAIHATSU 6DE-23, виявлено зниження стабільності частоти обертання при

ступеневому навантаженні середньої величини, що призвело до збоїв у роботі чутливого електрообладнання.

Це означає, що в експлуатації існує необхідність ручного переналаштування електронних РЧО під час зміни режимів роботи ДГ на основі візуальної оцінки стабільності частоти обертання, що ускладнює технічне обслуговування та підвищує ймовірність відмов [2].

Як наслідок, актуальною є проблема забезпечення якості регулювання частоти обертання судових ДГ з електронними РЧО контролерного типу без необхідності вимушеного періодичного ручного переналаштування в процесі експлуатації.

У зв'язку з викладеним метою роботи є забезпечення якісної роботи контролерних електронних РЧО судових ДГ в експлуатації.

Для оптимізації параметрів електронних РЧО доцільно використовувати математичне моделювання [3], яке дозволяє проводити дослідження з меншими витратами ресурсів, уникати спотворення отриманих результатів випадковими факторами та відтворювати різноманітні комбінації експлуатаційних умов судових дизелів.

Як об'єкт дослідження обрано ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR з електронним контролерним РЧО SaCoS_{one} компанії Everllence та виконавчим механізмом (ВМ) Regulateurs Europa типу 2800. Дана дизель-генераторна установка має номінальну потужність 500 кВт і номінальну частоту обертання 720 хв^{-1} , є чотиритактною, тронковою, нереверсивною.

Для моделювання використана модель САРЧ судового чотиритактного дизеля з електронним РЧО та гідравлічним ВМ, в якій враховується циклова нестабільність крутного моменту [4]. Модель дозволяє аналізувати вплив параметрів налаштування РЧО на динамічні властивості САРЧ дизеля та враховує запізнення у каналі передачі керуючого впливу від регулятора до дизеля, зумовлене циклічністю подачі палива та особливостями зміни крутного моменту в кривошипно-шатунному механізмі.

Нижче приведені значення параметрів моделі відповідно до конструкторської документації [5]:

час розгону ДГ $T_d = 1,8 \text{ с}$;

кут випередження упорскування палива $\varphi_i = -14,5 \text{ град. ПКВ}$;

нерівномірність вимірювача частоти обертання $\delta_c = 0,08 \text{ відн. од.}$;

коефіцієнт підсилення пропорційної ланки $k_p = 0,1 \dots 5 \text{ відн. од.}$;

час інтегруючої ланки $T_i = 0,5 \dots 8 \text{ с}$;

коефіцієнт передачі диференціюючої ланки $k_d = 0 \dots 1 \text{ відн. од.}$;

відносна ширина зони нечутливості $\varepsilon = 0,002 \text{ відн. од.}$;

коефіцієнт передачі зони нечутливості $k_g = 1 \text{ відн. од.}$;

нерівномірність керуючого елемента ВМ $\delta_{c.a} = 0,04 \text{ відн. од.}$;

час ВМ РЧО $T_c = 0,47$ с;

коефіцієнт зворотного зв'язку $k_{fb} = 0$ відн. од.;

коефіцієнт використання ходу регулятора під час переходу від нульової до номінальної подачі палива $k_{u,m} = 0,8$ відн. од.

Аналіз потужностей споживачів танкера та їхнього співвідношення з потужністю ДГ (з урахуванням кількості працюючих споживачів на різних експлуатаційних режимах та ймовірності їхнього вмикання) показав, що САРЧ суднових дизель-генераторних установок в умовах реальної експлуатації має забезпечувати необхідну динаміку в широкому діапазоні змін навантаження [6]. У зв'язку з цим, визнано доцільним провести дослідження впливу величини ступеневої зміни відносного моменту навантаження ΔM_r у діапазоні 10 ... 100 % на закидання частоти обертання ДГ. Дослідження виконано при зміні коефіцієнта підсилення пропорційної ланки k_p , часу інтегруючої ланки T_i , а також коефіцієнта передачі диференціюючої ланки k_d . Обрані діапазони варіювання параметрів налаштування електронного РЧО суднового ДГ у конструктивно визначених межах становили: $k_p = 1 \dots 2,5$ відн. од.; $T_i = 0,65 \dots 1,85$ с; $k_d = 0 \dots 0,1$ відн. од. Параметри варіювання k_p та T_i змінювалися у 1,25 та 1,3 разів відповідно. Значення параметра k_d змінювалося з кроком 0,025.

У реальних умовах експлуатації суднових ДГ чим менші амплітуди ступеневих збурень, тим більша ймовірність їхнього виникнення. Відповідно, обґрунтованим можна вважати налаштування САРЧ ДГ з електронним РЧО контролерного типу на таку амплітуду збурення, що має більшу ймовірність виникнення і водночас має істотний вплив на динаміку САРЧ ДГ.

На рис. 1 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями пропорційно-інтегро-диференціюючого (ПІД) контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,0$ відн. од.; $T_i = 1,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

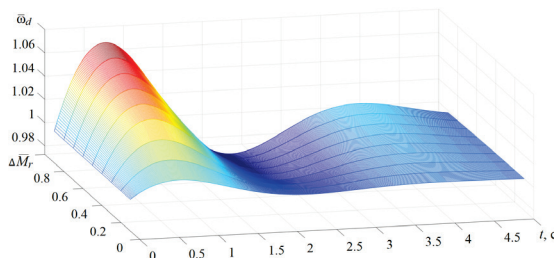


Рис. 1. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО $k_p = 1,0$ відн. од.; $T_i = 1,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

Із рис. 1 випливає, що для збурень 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,1 та 1,5 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 2 с. У діапазоні збурень 30 ... 100 % закидання частоти обертання ДГ становить 2,0 ... 6,5 %, а час регулювання знаходиться в межах 3,0 ... 4,5 с.

На рис. 2 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,25$ відн. од.; $T_i = 1,45$ с; $k_d = 0,025$ відн. од.

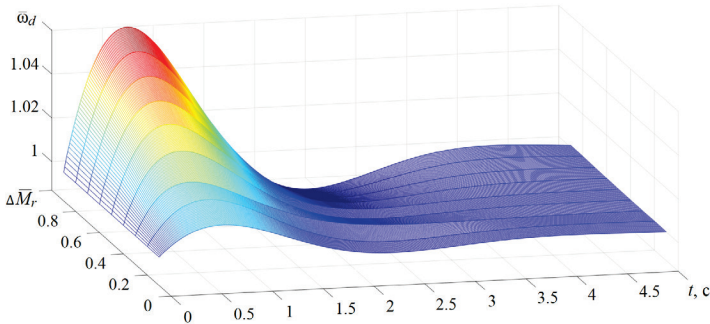


Рис. 2. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,25$ відн. од.; $T_i = 1,45$ с; $k_d = 0,025$ відн. од.

Із рис. 2 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 0,9 та 1,4 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 2,5 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2 ... 3 %, при цьому час регулювання не перевищує 3 с. За зміни навантаження в діапазоні 60 ... 100 % закидання зростає до 3,5 ... 6,0 %, а час регулювання до 4 с.

На рис. 3 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,55$ відн. од.; $T_i = 1,10$ с; $k_d = 0,05$ відн. од.

Із рис. 3 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,3 та 1,6 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 3 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2,1 ... 2,8 % при часі регулювання до 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 3,0 ... 5,8 % і час регулювання не перевищує 3,5 с.

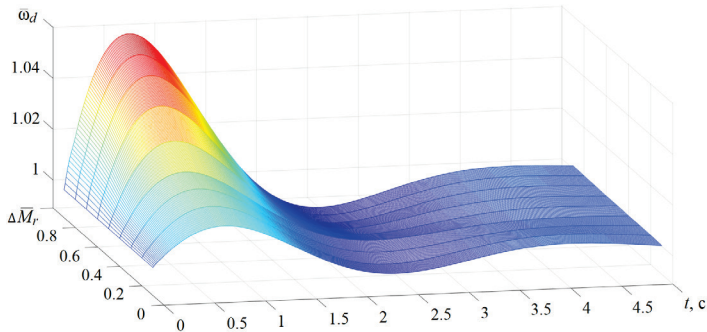


Рис. 3. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,55$ відн. од.; $T_i = 1,1$ с; $k_d = 0,05$ відн. од.

На рис. 4 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ HYUNDAI MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0,075$ відн. од.

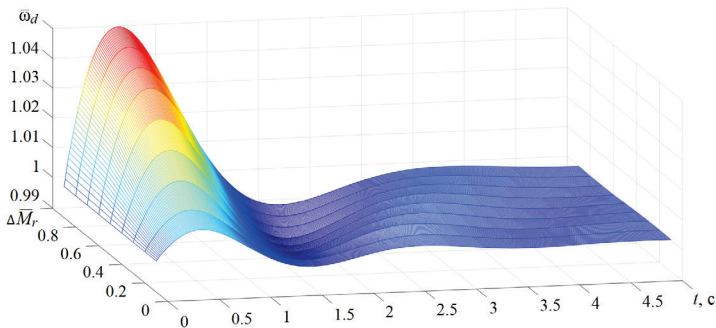


Рис. 4. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0,075$ відн. од.

Із рис. 4 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,0 та 1,3 % від номінальної частоти обертання ДГ, при цьому час регулювання не перевищує 2,5 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2 ... 3,5 % при часі регулювання до 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 4 ... 5 % і час регулювання не перевищує 3,5 с.

На рис. 5 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.

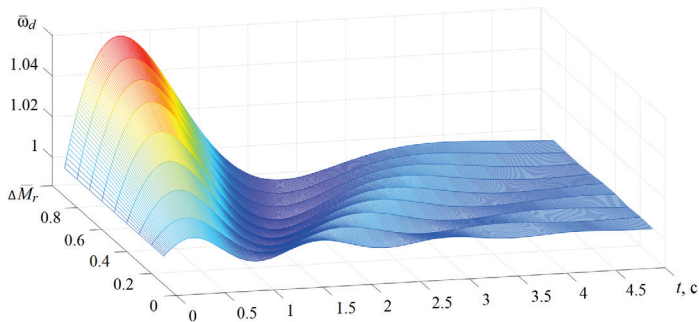


Рис. 5. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.

Із рис. 5 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить 0,8 та 1,3 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання відповідно 1,7 та 1,9 с. За збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ не перевищує 3 % при часі регулювання 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 4 ... 6 %, а час регулювання не перевищує 3,5 с.

Із рис. 1 – 5 випливає, що при будь-яких (в обраному діапазоні варіювання) налаштуваннях регулятора при значеннях ΔM_r до 20 % динамічний закид частоти обертання становить 0,8 ... 1,6 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не більше 2 с. Це означає, що істотність впливу на динаміку САРЧ величини ступеневої зміни навантаження до 20 % ΔM_r є несуттєвою. У зв'язку з цим, оптимізація ПІД контролерів електронних РЧО, які можуть налаштовуватися в експлуатації в залежності від величини відхилення фактичної частоти обертання ДГ від заданої, доцільна у діапазоні величин збурення 20 ... 100 %.

Для оптимізації із урахуванням істотності впливу ступеневих збурень на динаміку САРЧ обґрунтовано є величина збурення 20 %, оскільки в експлуатації суднових ДГ менші амплітуди є імовірнішими. Для такої величини оптимальне налаштування ПІД контролера становить: $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

У дослідженні під "оптимальним" налаштуванням електронного РЧО розуміється таке, що забезпечує мінімум закидання регульованої величини при максимальному скиданні навантаження з дотриманням дозволеного стандартами часу регулювання частоти обертання ДГ.

У табл. наведено порівняння експериментальних значень показників якості зі штатним ($k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.) та запропонованим ($k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.) налаштуванням ПІД контролера електронного РЧО для шести варіантів скидання/накидання навантаження.

Таблиця

Експериментальні значення показників якості

Зміна навантаження, %	Штатне налаштування		Запропоноване налаштування	
	закидання частоти обертання ДГ, хв^{-1}	час регулювання, с	закидання частоти обертання ДГ, хв^{-1}	час регулювання, с
100 $\rightarrow$ 0	43	2,7	52	2,9
100 $\rightarrow$ 50	40	3,5	19	3,3
100 $\rightarrow$ 75	37	3,4	11	2,7
0 $\rightarrow$ 25	39	3,5	13	2,8
0 $\rightarrow$ 50	45	3,7	24	3,2
50 $\rightarrow$ 100	43	4,0	23	3,7

При запропонованому налаштуванні РЧО регламентовані вимоги до закидання частоти обертання та часу регулювання дотримуються в усіх перехідних режимах. Таким чином, оптимальним для найімовірнішого суттєвого збурення 20 % налаштуванням ПІД контролера електронного регулятора дизель-генераторної установки вдалося підвищити стабільність частоти обертання до 12 %.

У ході дослідження САРЧ ДГ з електронним РЧО встановлено:

збільшення коефіцієнта підсилення пропорційної ланки ПІД контролера вище 2 відн. од. зменшує величину закидання частоти обертання ДГ, проте при збуреннях, вищих за 20 %, виникає перерегулювання в САРЧ дизель-генераторної установки. При значеннях 1 ... 1,5 відн. од. перерегулювання істотно зменшується, проте стабільність частоти обертання ДГ погіршується;

зниження часу інтегруючої ланки нижче 0,85 с збільшує нестабільність до 0,8 % від номінальної частоти обертання ДГ при зміні навантаженні до 40 %, а значення T_i 1,45 ... 1,85 с – тривалість

перехідного процесу регулювання – на 0,3 ... 0,8 с при зміні навантаження 40 ... 100 %;

збільшення коефіцієнта передачі диференціюючої ланки не покращує динаміку САРЧ при значеннях коефіцієнта підсилення пропорційної ланки 1,5 ... 2 відн. од.

Із цього випливає, що для електронного РЧО суднових ДГ доцільно обнулення диференціюючої складової у поєднанні з підвищенням коефіцієнта підсилення пропорційної ланки до 1,5 ... 2 відн. од. При цьому інтегруючу складову рекомендується задавати у межах 0,85 ... 1,45 с для покращення стабільності частоти обертання ДГ при збуреннях до 40 %, та зменшенні тривалості перехідного процесу регулювання при зміні навантаження на ДГ 40 ... 100 %.

Запропонована методика вибору параметрів налаштування РЧО дозволила адаптувати роботу САРЧ до реальних умов експлуатації ДГ, а також усунути необхідність вимушеного періодичного ручного переналаштування регуляторів. При цьому показано, що навіть у налаштованому заводом-виробником електронному РЧО суднових ДГ є резерви оптимізації експлуатаційних режимів з урахуванням істотності впливу величини скидання/накидання навантаження та ймовірності її виникнення в експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Babamohammadi S., Birss A., Pouran H., Pandhal J., Borhani T. Emission control and carbon capture from diesel generators and engines: A decade-long perspective. // Carbon Capture Science & Technology. – 2025. – Vol. 14. – № 100379. – 34 p.
2. Stoumpos S., Bolbot V., Theotokatos G., Boulougouris E. Safety performance assessment of a marine dual-fuel engine by integrating failure mode, effects, and criticality analysis with simulation tools. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2022. – № 236 (2). – P. 376 – 393.
3. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125 – 132.
4. Budurov M., Gorb S., Popovskii A. Optimization of electronic speed governors sensitivity for marine diesel engines. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 2. – № 8 (134). – P. 26 – 35.
5. Project guide for GenSet MAN L23/30H. – Режим доступу: https://man-es.com/applications/projectguides/4stroke/manualcontent/L23-30H_GenSet_TierII.pdf (дата звернення: 22.03.2026).

6. Горб С. І., Поповський О. Ю., Будуров М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 – 16.

Abstract. In recent years, electronic speed governors implemented on the basis of programmable logic controllers have become widely used in automatic control systems of marine diesel generators. At the same time, during the operation of auxiliary diesel engines equipped with such controllers, problems often arise in ensuring control quality due to insufficient dynamic performance under load changes, which directly affects maritime safety.

The operational cases presented in this study indicate the need for forced periodic manual retuning of controller-based electronic governors in marine diesel generator units based on visual assessment of speed stability. In this regard, to ensure the required operational control quality, a study was conducted using mathematical modeling to investigate the effect of step changes in the relative load torque within the range of 10 ... 100 % on the speed deviation of a diesel generator, considering variations within the design-specified ranges of proportional gain, integral time, and derivative gain.

The results show that when using electronic governors with PID controllers, the operation of marine diesel generators should be adapted to variable operating conditions by optimizing controller settings for a step change in relative load torque of approximately 20 %, which has a higher probability of occurrence among significant load variations in practice. For such a disturbance, it is advisable to set the derivative component of the PID controller to zero while increasing the proportional gain to 1.5 ... 2.0 rel.un. At the same time, the integral component is recommended to be set within the range of 0.85 ... 1.45 s to reduce speed instability of the auxiliary unit while maintaining the transient response duration within the limits prescribed by standards.

A methodology for selecting PID controller parameters of electronic governors for marine diesel generators under the most probable significant load shedding / acceptance has been proposed, allowing optimization of the automatic speed control system in accordance with real operating conditions. The methodology was validated on a marine diesel generator unit MAN 5L23/30H Mk3 ECR equipped with SaCoS_{one} electronic governor, demonstrating an improvement in speed stability of up to 12 % without violating the standard requirements for speed control during maximum permissible load shedding.