

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СУДНОВОЇ УСТАНОВКИ

Наговський Д.А., Дощенко Г.Г. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: паралельна робота, електротехнічний комплекс, колювання потужності, математична модель, синхронний генератор, дизель-генераторний агрегат.

Сучасні суднові електротехнічні комплекси мають різну конфігурацію і складаються з великої кількості елементів, для кожного з них існують математичні описи. Для проведення досліджень, спрямованих на усунення обмінних колювань потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами необхідно об'єднати наявну інформацію та отримати математичну модель реального суднового електротехнічного комплексу. У математичній моделі необхідно відобразити існування не лінійності «люфт» у контурі керування частотою обертання дизеля з метою виявлення причин виникнення обмінних колювань потужності. При математичному моделюванні паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів у складі комплексу суднового електроустаткування використано дані про автономну дизель-генераторну електростанцію змінного струму. Для простоти моделювання суднового електроустаткування вимикачі генераторів представлені активними опорами.

Вступ

Суднові електротехнічні комплекси сучасних суден характеризуються високою встановленою потужністю споживачів та генераторів, високою ступеню автоматизації управління, широким впровадженням напівпровідникової техніки, використанням сучасних мікроконтролерів та відповідного програмного забезпечення в системах управління, контролю та діагностики.

Зміна характеру споживачів суднової електричної енергії призвело до загострення проблеми якості електричної енергії та вимагає більш ґрунтованого вибору параметрів елементів суднових систем на ранніх стадіях проектування.

Організація ефективної паралельної роботи генераторних агрегатів є важливим питанням для будь-якої електрогенераційної установки, а особливо для морського судна при сумірності потужностей джерел і споживачів. Тут можна виділити два аспекти, які пояснюють важливість цієї проблеми. В першу чергу, це забезпечення безпеки судна та людей, що знаходяться на ньому, оскільки порушення паралельної роботи може привести до розвалу енергосистеми, знеструмлення судна, втрати керованості і, як результату, катастрофи. По-друге, важливою є економічна складова експлуатації будь-якого судна. Низька якість виробленої електроенергії призводить до підвищеного витрати палива, збільшення

рейсового часу, появи додаткових витрат, пов'язаних з ремонтом обладнання тощо.

Актуальність досліджень

На морських суднах застосовується найбільш раціональна з технічного та економічного боку схема виробництва електричної енергії з паралельною роботою кількох дизель-генераторних агрегатів [1].

Кількість електричних генераторів на морському транспортному судні становить від двох до семи, тому моделі багато генераторної установки стикається з великою кількістю конфігурацій мережі включених та відключених електроагрегатів.

Синхронні генератори видаються рівняннями Парка-Горева [2] в нерухомих щодо ротора d і q координатах:

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \quad (3)$$

де $\psi_{sd}, u_{sd}, i_{sd}$ – проекції векторів потокозчеплення, напруги та струму статора на вісь d ;
 $\psi_{sq}, u_{sq}, i_{sq}$ – проекції векторів потокозчеплення, напруги та струму статора на вісь q ;
 r_s – опір обмотки статора генератора;
 ψ_f – потокозчеплення генераторної обмотки збудження;
 i_f – струм генераторної обмотки збудження;
 u_f – напруга генераторної обмотки збудження;
 r_f – опір генераторної обмотки збудження;
 τ – тривалість процесу.

Кількість станів l генераторних автоматичних вимикачів з урахуванням живлення з берега становить 2^{n+1} . Модель кожної конфігурації суднової мережі має рівняння для струмів та напруги кожного ввімкненого генератора та навантаження. Для спрощення моделювання багато генераторної установки пропонується представляти стани генераторних вимикачів активними з опорам R_{ki} (див. рис. 1).

Рівняння, що описують процеси включення генераторів на паралельну роботу, складаються спільно з рівняннями ключів, що з'єднують генератори між собою або з мережею.

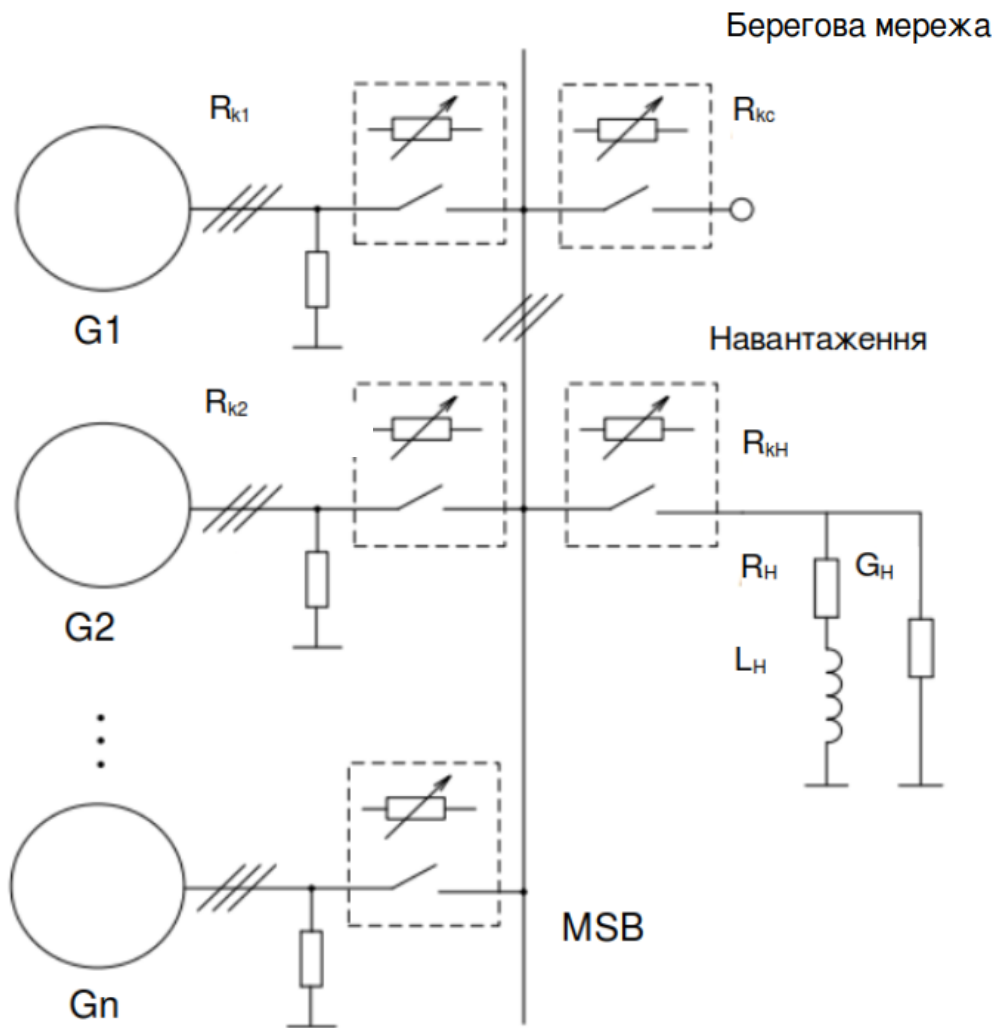


Рисунок 1. Типова схема суднової електростанції

Постановка задачі. Головною метою дослідження є аналіз причин існуючих проблем у паралельній роботі дизель-генераторних агрегатів (ДГА) та пошук методів їх усунення. Необхідно провести дослідження з використанням математичної моделі з метою виявлення впливу обмінних коливань потужності на сталу паралельну роботу ДГА та якість електроенергії, а також встановити залежність стійкості роботи електрогенераційної суднової установки від значень та

співвідношення коефіцієнтів посилення частотних регуляторів.

Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів на базі синхронних генераторів у складі електроенергетичної системи обмеженої потужності, аналізу причин існуючих проблем та пошуку методів їх

усунення використана математична модель з рівняннями, що описують роботу наступних елементів: синхронних генераторів; систем збудження та регуляторів напруги генераторів; дизелів як теплоенергетичних приводів ДГА; систем управління та стабілізації частоти обертання ДГА; активного та реактивного електричних навантажень електростанції; пристроїв комутації та розподілу навантаження.

Математичний опис всіх елементів реальної електростанції (значення або діапазони зміни параметрів) дало можливість скласти математичну модель суднового електротехнічного комплексу [3, 4] і, реалізувавши її в комп'ютерній програмі, отримати графіки миттєвих значень моментів M_{g1} , M_{g2} , струмів I_{a1} , I_{a2} , частот обертання роторів r_1 , r_2 , кутів навантаження T_{et1} , T_{et2} паралельно працюючих генераторів (рис. 2).

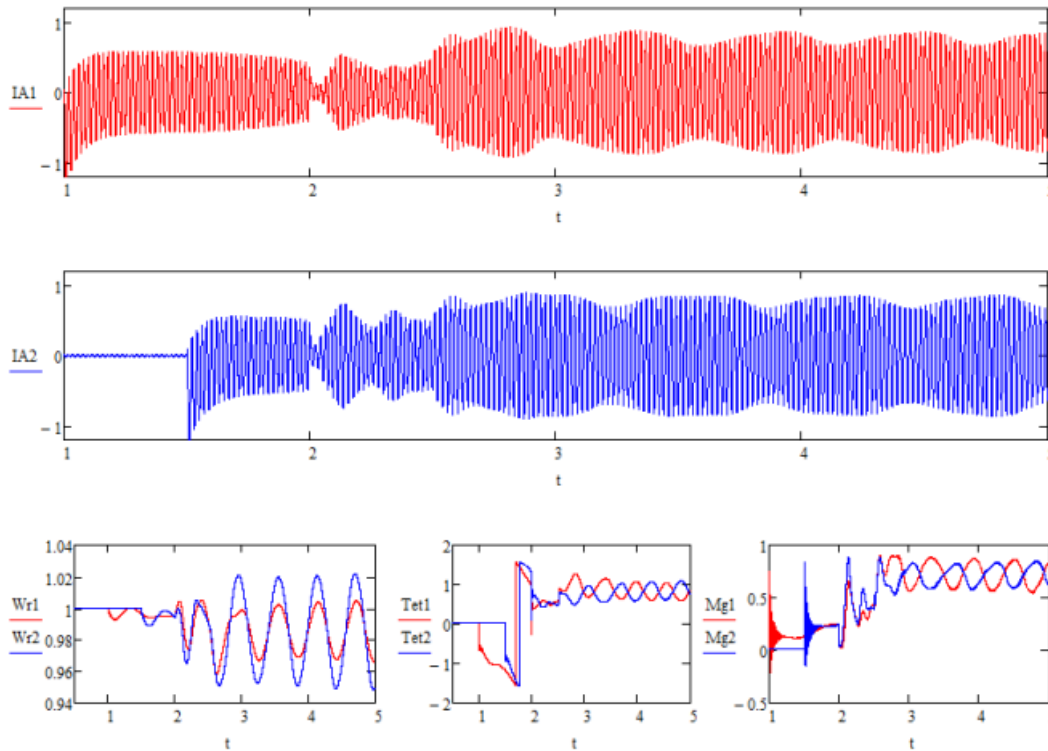


Рисунок 2. Результати математичного моделювання при $D_{n1} = 0,002$, $D_{n2} = 0,02$, $K_{\omega 1} = 50$, $K_{\omega 2} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

На рис. 2 видно коливання потужності в електроенергетичній системі при паралельній роботі ДГА, коли максимуму струму одного генератора відповідає мінімуму струму іншого, і навпаки.

Обмінні коливання – явище своєрідного переходу потужності від одного ДГ до іншого з частотою, що вимірюється кількома герцами. Через виникнення обмінних коливань потужності між паралельно працюючими ДГА змінного струму має місце проблема забезпечення сталої паралельної роботи та необхідної якості електроенергії. Дослідження, проведені з використанням отриманої математичної моделі, показали, що обмінні коливання з'являються після введення проміжків люфта D_{n1} , D_{n2} .

Висновки

Проведені дослідження продемонстрували залежність стійкості роботи електрогенераційної суднової установки із зустрічно-паралельним включенням на шини головного розподільного щита дизель-генераторних агрегатів від значень

та співвідношення коефіцієнтів посилення частотних регуляторів. Запропонована математична модель електрогенераційної суднової установки дозволяє досліджувати різні режими роботи автономної дизель-генераторної електростанції змінного струму і виявляти причини виникнення обмінних коливань потужності.

Література

[1]. Geertsma R.D., Visser K., Negenborn R.R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied Energy*, 2018, 228, P. 2490-2509. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.

[2]. M. Godoy Simões, Felix A. Farret Modeling and analysis with induction generators, 3rd edition, 2018, 468 p. – ISBN-13: 978-1-4822-4469-4.

[3]. Ruofa Cheng*, Wenlong Zhao, Hongfeng Deng and Xiaozhou Jiang Modeling and Optimization Control for Aircraft AC Generator Brushless Excitation System Based on Improved Adaptive

PSO. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2015, 7, p. 21-30.

[4]. Surya Santoso, Wayne Beaty. Standard Handbook for Electrical Engineers, 17th Edition, 2018, 1648 p. – ISBN: 9781259642586.

Відомості про авторів

Дмитро Наговський, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматичної, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6920-0324](#).



Галина Доценко, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматичної, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1004-4934](#).

