



групування постачальників вантажу // Прикладні питання математичного моделювання. – Херсон, 2020. – Т. 3, №1. – С. 187 – 193.

5. Славич В.П., Калімбет Р.В., Портер К.А. Транспортна задача мінімізації зворотного порожнього пробігу при перевезенні вантажів в умовах наявності обмежень за пропускною здатністю ланок мережі // Матеріали VII-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні технології промислового комплексу – 2021", м. Херсон – 2021. – С. 227–230.

---

УДК 621.313

**Галина ДОЩЕНКО**

*к.т.н.,*

*доцент кафедри експлуатації суднового  
електрообладнання і засобів автоматики,  
Херсонська державна морська академія*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАЛОЇ РОБОТИ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

**Вступ.** На борту будь-якого морського судна є автономний електротехнічний комплекс, що складається з генеруючих та які споживають електроенергію пристроїв та механізмів [1]. Умови та особливості експлуатації електротехнічних комплексів морських суден регламентуються вимогами морського Регістру судноплавства та Міжнародної морської конвенції про збереження людського життя на морі СОЛАС. Як джерела електроенергії частіше всього використовуються спільно-паралельно включені дизель-генераторні агрегати на головний розподільний щит. Перелік потужностей та номенклатури споживачів дуже широкий і визначається типом та призначенням судна. Підтримка сталої роботи електростанції морського судна з виробленням якісної електроенергії є життєво важливою умовою безпеки морського судна та виконання ним своїх технологічних та виробничих завдань.

**Актуальність дослідження.** На морських судах застосовується найбільш раціональна з технічного та економічного боку схема виробництва електричної енергії з паралельною роботою кількох дизель-генераторних агрегатів [1]. Кожен дизель-генератор має свій регулятор частоти оберту та регулятор напруги. Налаштування регуляторів визначають розподіл навантаження між агрегатами у квазіустановлених режимах експлуатації електричних



силових комплексів морських суден виникають обмінні та синфазні коливання потужності між спільно-паралельно включеними генераторами. Для усунення таких коливань необхідно здійснювати вплив на регулятори частоти обертання та змінювати їх коефіцієнти передачі так, щоб не порушувалася стійка робота всього електротехнічного комплексу судна.

**Постановка задачі.** Однією з проблем електротехнічних суднових комплексів морських суден вважається поява обмінних та синфазних коливань потужності при спільно-паралельному включенні дизель-генераторних агрегатів [1]. Такі коливання призводять до прискореного використання ресурсу частотних регуляторів обертання дизелів, неможливості використання генеруючих пристроїв на повну потужність, до пульсуючої форми напруги в електричній мережі судна, зниження характеристики корисної дії електричних приводів та систем суднової автоматики, а також необхідно скористатися математичним моделюванням та оцінити допустимі межі та співвідношення при зміні коефіцієнтів посилення частотних регуляторів.

Для синхронних машин, які мають на роторі обмотку збудження повільна кількість  $0...n_d$  еквівалентних короткозамкнутих контурів в осі  $d$  та повільна кількість  $0...n_q$  еквівалентних короткозамкнутих контурів в осі  $q$ , рівняння Парка-Горева [2] в одиницях можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{d\psi_d}{dt} + \omega\psi_q + r i_d = -u_d \quad (1)$$

$$\omega\psi_d - \frac{d\psi_q}{dt} - r i_q = u_q \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} + r_r i_r = E_r \quad (3)$$

де  $\psi_d, u_d, i_d$  – проекція вектору потокозчеплення, напруги та струму статора на ось  $d$ ;

$\psi_q, u_q, i_q$  – проекція вектору потокозчеплення, напруги та струму статора на ось  $q$ ;

$\psi_r, i_r, r_r$  – проекція вектору потокозчеплення, струму та активний опір обмотки збудження;

$E_r$  – напруга збудження;

$\tau$  – тривалість процесу.

**Результати дослідів.** Однією з маловивчених проблем паралельної роботи генераторних агрегатів на основі синхронних генераторів змінного струму, які в основному застосовуються в суднових електротехнічних комплексах, є обмінні коливання потужності [1, 3]. Вимоги класифікаційних товариств та міжнародні



стандарту не містять допустимих норм, що обмежують рівень таких коливань. А тим часом обмеження амплітуди обмінних коливань потужності безпосередньо пов'язане із забезпеченням стійкої роботи електротехнічних комплексів.

Відомо, що обмінні коливання потужності між паралельно працюючими агрегатами призводять до підвищеного зносу регуляторів частоти обертання, обмежують використання потужності генераторних агрегатів, що викликають пульсацію напруги мережі, зменшують коефіцієнт корисного дії електроприводів і механізмів, що негативно позначаються на психофізичному стані персоналу, знижують ефективність і надійність роботи систем автоматизації, можуть призвести навіть до випадання синхронного генератора із синхронізму, аж до знеструмлення суднового електротехнічного комплексу, що є аварійною ситуацією, а отже, несе загрозу життю людей і безпеці товарів та продукції.

На рисунку 1 представлені результати дослідження математичними методами у вигляді графіків струмів та частот обертання двох спільно-паралельно включених на шини головного розподільного щита генераторів при значення коефіцієнтів передачі їх регуляторів частоти обертання  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$ , на яких видно синфазні коливання потужності з амплітудою, що не збільшується, частоти обертання генераторів при цьому прагнуть до встановленого значення.

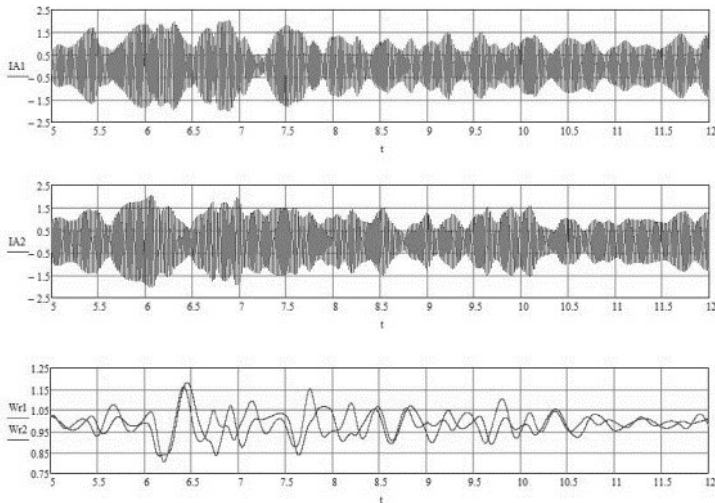


Рис. 1. Результати математичного моделювання дослідження спільно-паралельної роботи генераторів при  $K_{\omega 1} = 80$ ,  $K_{\omega 2} = 40$

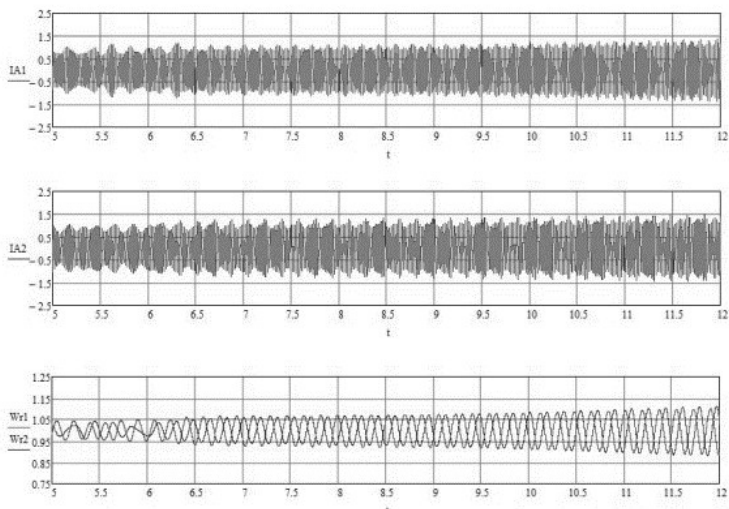


Рис. 2. Результати дослідження спільно-паралельної роботи генераторів при  $K_{\omega 1}= 350$ ,  $K_{\omega 2}= 250$

На рисунку 2 представлені результати математичного регулювання у вигляді графіків струмів і частот обертання двох спільно-паралельно включених на шини головного розподільчого щита генераторів при значеннях коефіцієнтів посилення їх частотних регуляторів  $K_{\omega 1}= 350$ ,  $K_{\omega 2}= 250$ .

Очевидна наявність синфазних коливань струмів, тобто і потужностей з наростаючою амплітудою, миттєві частоти обертання генераторів при цьому також ростуть, що свідчить про втрату стійкості у роботі суднової електростанції, і наближення спрацьовування захисту з наступним знеструмленням судна.

**Висновок.** Проведені дослідження продемонстрували залежність стійкості роботи суднового електротехнічного комплексу із зустрічно-паралельним включенням на шини головного розподільного щита дизель-генераторних агрегатів від значень та співвідношення коефіцієнтів посилення частотних регуляторів. На основі результатів математичного моделювання можна рекомендувати обмежити зміну коефіцієнтів посилення частотних регуляторів при паралельній роботі у діапазоні 0 – 200. Таке обмеження необхідно враховувати при зміні коефіцієнтів посилення частотних регуляторів для усунення обмінних коливань потужності.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С. [и др.]. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1-1 (43). С. 103–109.
2. Алейников А. В., Голубев А. Н., Мартынов В. А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37–43.
3. Mondejar M. E., Andreasen J. G., Pierobon L. [et al.]. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 126–151. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.

---

УДК 621.791.01.670

**Валерій МАКАРЕНКО**

*д.т.н., професор,*

*Херсонський національний технічний університет*

## ВІДНОВЛЕННЯ МОРСЬКИХ ТА РІЧКОВИХ ПРИЧАЛІВ ХЕРСОНЩИНИ

Відомо, що основним матеріалом в будівництві морських та річкових портів та причалів є залізобетон який піддається в процесі тривалої експлуатації, крім силового впливу, ще й корозійній дії – навколишнього середовища технічних сумішей, які явно знижують міцність, сприяючи передчасному руйнуванню. Бетон – це багатокомпонентний матеріал, який володіє властивостями пружності, псевдо пластичності, старіння та неоднорідністю на усіх мікро і макро рівнях його структури, яка, в свою чергу, залежить від рівня прикладених навантажень, характеру і тривалості їх дії. Особливо для бетону великою загрозою є хлоридна корозія і його карбонізація, яка приводить до руйнування захисного шару арматури, внаслідок чого інтенсивно починається корозія самої арматури. Корозійні ушкодження арматурних стрижнів сприяють зниженню їх механічних властивостей, особливо в'язко-пластичних, що може спричинити крихке передчасне руйнування залізобетонних конструкцій, які експлуатуються тривалий час в агресивних середовищах, характерних для річкових та морських причалів. Однак інформація, яка є в наявності і в значній мірі викладена в літературних джерелах,