

УДК 621.313.10

О. Є. Савенко, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОРОМА «ЄЙСЬК»

Розглянуто проблему виникнення обмінних коливань потужності під час паралельної роботи синхронних генераторів у складі суднової електростанції порома «Єйськ». За допомогою методів математичного моделювання виявлено їх причину і запропоновано метод усунення. Результати підтверджено експериментальними дослідженнями.

Вступ

Автомобільний пором «Єйськ» здійснює вантажопасажирські перевезення між портом «Крим» і портом «Кавказ». Це досить сучасне судно з гребною електричною установкою на основі двох двигунів постійного струму МП2-М-630-152-8-М3. Основними джерелами електричної енергії на судні є три синхронних генератора змінного струму 6VD26/20-AL-2, які працюють у паралельному режимі. Гребні двигуни отримують живлення від шин головного розподільного щита через тиристорні перетворювачі. До найпотужніших споживачів можна також віднести бортовий підрулювальний пристрій, який має гвинт регульованого кроку з приводом від асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю 135 кВт. Дизелі, які приводять в обертання ротори генераторів, обладнані механічними регуляторами частоти обертання РН-30, а самі генератори мають регулятори напруги.

Під час ходу судна через Керченську протоку вахтова служба, яка знаходиться на центральному посту управління, спостерігає коливання в широкому діапазоні стрілок амперметрів і ватметрів, встановлених на генераторних секціях головного розподільного щита. Це явище говорить про наявність обмінних коливань потужності між синхронними генераторами під час їх паралельної роботи, що порушує стійку роботу суднової електроенергетичної установки і може призвести до знеструмлення всього судна [1]. Ця ситуація є аварійною, а отже неприпустимою для пасажирського судна [2].

Дослідження методами математичного моделювання

Для вивчення роботи суднової електростанції використана її математична модель [3—5], яка дозволяє отримати у вигляді графіків миттєві значення у відносних одиницях напруг U_{a1} , U_{a2} , моментів Mg_1 , Mg_2 , струмів I_{a1} , I_{a2} , частот обертання роторів ω_{r1} , ω_{r2} паралельно працюючих генераторів (рис. 1).

Синхронні генератори описані в d і q координатах, які жорстко пов'язані з ротором за допомогою рівнянь Парка—Горева, які описують перехідні електромагнітні та електромеханічні процеси

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{sd}}{dt} &= \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}; \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} &= -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}; \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= u_f - r_f i_f,\end{aligned}$$

де ψ_{sd} , ψ_{sq} — проекції векторів потокозчеплень статора на осі d і q ; u_{sd} , u_{sq} — проекції вектора напруги статора на осі d і q ; r_s — опір статорної обмотки; i_{sd} , i_{sq} — проекції вектора струму статора на осі d і q ; ψ_f , i_f , u_f , r_f — потокозчеплення, струм, напруга і опір обмотки збудження; t — час.

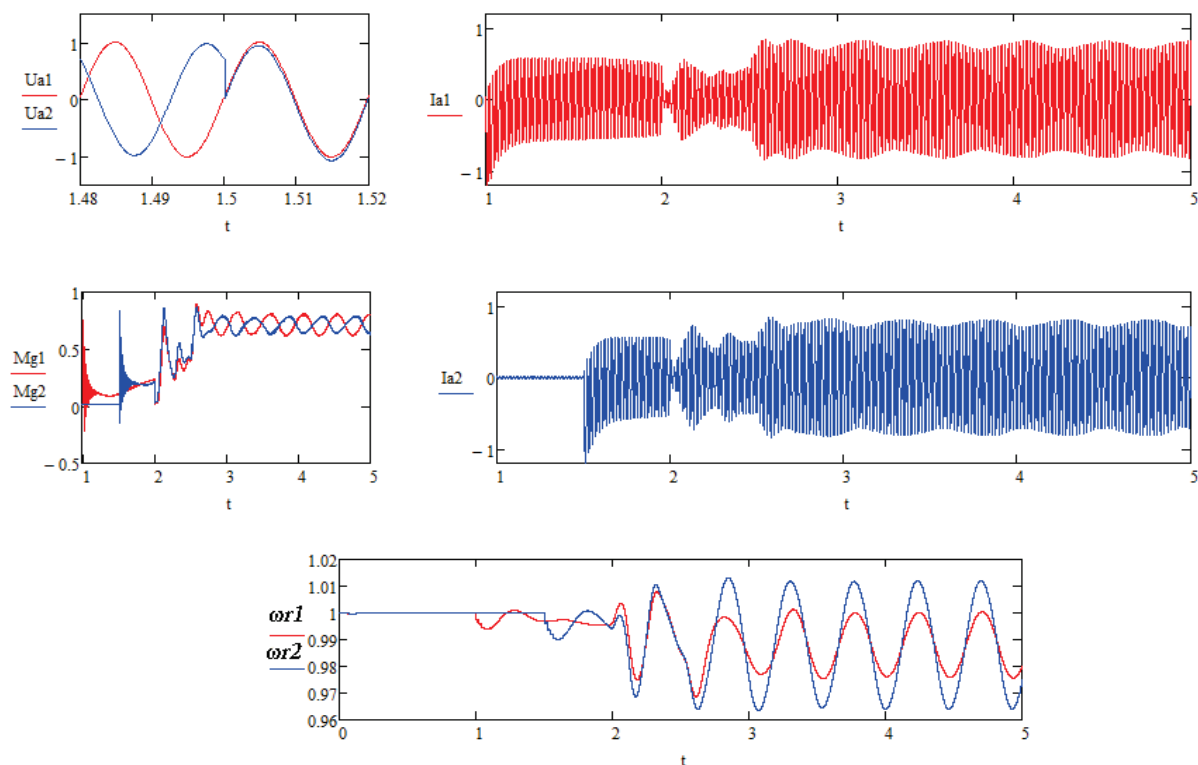


Рис. 1. Результати моделювання: $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1,0$

$$\Psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f;$$

$$\Psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq};$$

$$\Psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f,$$

де L_{sd}, L_{sq} — індуктивності розсіювання статорної обмотки; L_d, L_q — індуктивності головного контуру намагнічування по осях d, q ; L_f — індуктивність обмотки збудження.

Збудник безщіткового синхронного генератора і пропорційний регулятор напруги описані таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f (U_0 - u_m)] / T_A,$$

де K_f — коефіцієнт передачі регулятора; $u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$; U_0 — задання по напрузі; T_A — постійна часу збудника.

Приводний двигун, в якості якого використовується дизель, вводиться в систему рівнянь у спрощеній формі

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_g;$$

$$M_d = K_m h, \quad M_g = \Psi_{sq} i_{sd} - \Psi_{sd} i_{sq},$$

де J_m — приведений момент інерції вала дизеля і ротора генератора; M_d — механічний момент дизеля; M_g — електромагнітний момент опору, що розвивається генератором; h — положення паливної рейки; K_m — коефіцієнт посилення дизеля по частоті обертання.

Регулятор частоти обертання дизеля представлений аперіодичною ланкою першого порядку

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h,$$

де T_{ω} — постійна часу виконавчого механізму; K_{ω} — коефіцієнт посилення регулятора; U_{ε} — сигнал розузгодження між заданою ω_{r0} і дійсною ω_r частотами обертання дизеля.

Внаслідок того, що регулятори частоти обертання мають властивість «люфт», то в їх рівняння введені зони нечутливості (рис. 2).

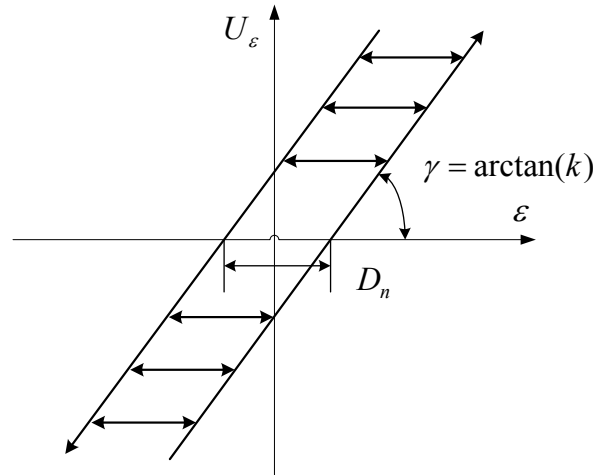


Рис. 2. Характеристика типу «люфт»

$$U_{\varepsilon} = \begin{cases} U_{\varepsilon} = \text{const} \text{ для } |U_{\varepsilon} - k\varepsilon| \leq D_n; \\ k \left(\varepsilon - D_n \text{sign} \left(\frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \neq 0, \end{cases}$$

де k — коефіцієнт передачі; D_n — величина люфта (зони нечутливості); ε — розузгодження між заданою ω_{r0} і дійсною ω_r частотами обертання дизеля.

У цій математичній моделі два паралельно включених синхронних генератори працюють на загальне активно-індуктивне навантаження. Таке представлення навантаження добре підходить для дослідження обмінних коливань потужності генераторів, що виникають під час паралельної роботи, в сталих режимах.

Для перетворення струмів статора синхронних генераторів з системи координат (d, q) , жорстко пов'язаної з ротором, в нерухому відносно статора систему координат (α, β) введені рівняння зв'язку

$$i_{\alpha} = i_{sd} \cos \omega_r t - i_{sq} \sin \omega_r t; \quad i_{\beta} = i_{sq} \cos \omega_r t - i_{sd} \sin \omega_r t.$$

Дослідження характеру зміни обвідних струмів генераторів виявило існування обмінних коливань потужності між генераторами, причому їх величина значно залежить від величини зони нечутливості, яка використовується для опису люфтів в механічних передачах.

На рис. 1 показані результати моделювання паралельної роботи двох синхронних дизель-генераторів автомобільного порома «Сйськ» з величинами зон нечутливості регуляторів частоти обертання дизелів $D_{n1} = 0,002$ і $D_{n2} = 0,01$. На графіках струмів і моментів генераторів можна побачити приблизно синусоїдальні криві з дзеркальним характером, тобто максимуму потужності одного генератора відповідає мінімум іншого генератора і навпаки, що і є основною ознакою наявності обмінних коливань потужності.

Для усунення цього явища, яке заважає нормальній експлуатації суднової електростанції, якраз і створювалася математична модель, оскільки на ній можна випробувати різні способи розв'язання цієї важливої задачі. Одним з найефективніших шляхів виявилось зменшення коефіцієнта посилення регулятора частоти обертання дизеля, тобто зменшення жорсткості його механічної харак-

теристики. Результати моделювання за пропонуваним способом зменшення обмінних коливань показані на рис. 3, де коефіцієнт посилення K_{ω} знижений до 20 для обох агрегатів в порівнянні з результатами (див. рис. 1), де він дорівнює 50. Проте видно помітне зниження до 0,92 частоти обертання в сталому режимі, що є недоліком.

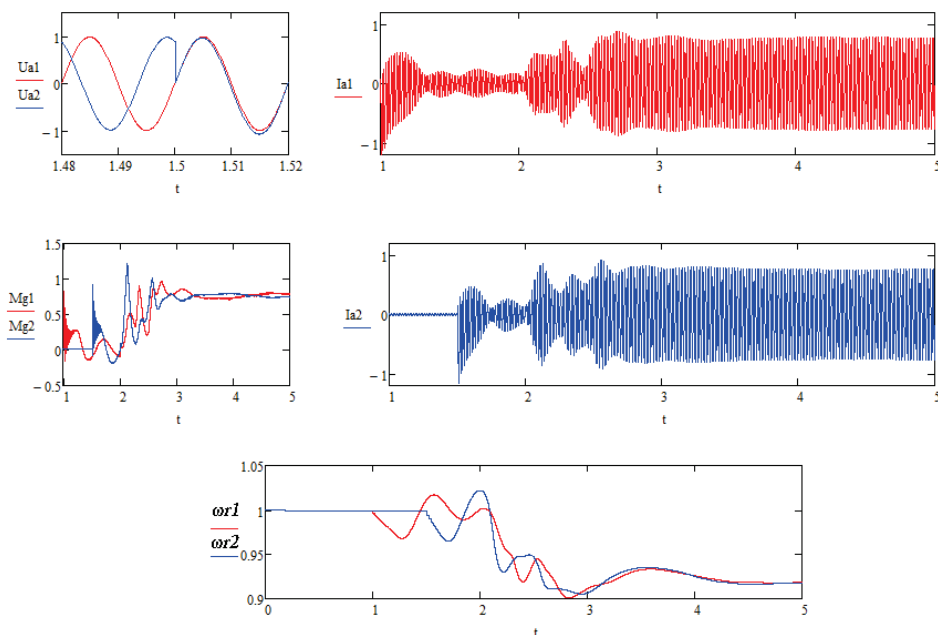


Рис. 3. Результати моделювання: $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 20$, $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1,0$

Для усунення падіння частоти обертання необхідно збільшити сигнал задання частоти обертання дизеля ω_{r0} . На рис. 4 показані результати моделювання для режиму, в якому K_{ω} для обох генераторів 20, а ω_{r0} збільшена до 1,06, при цьому частота обертання ротора близька до номінальної.

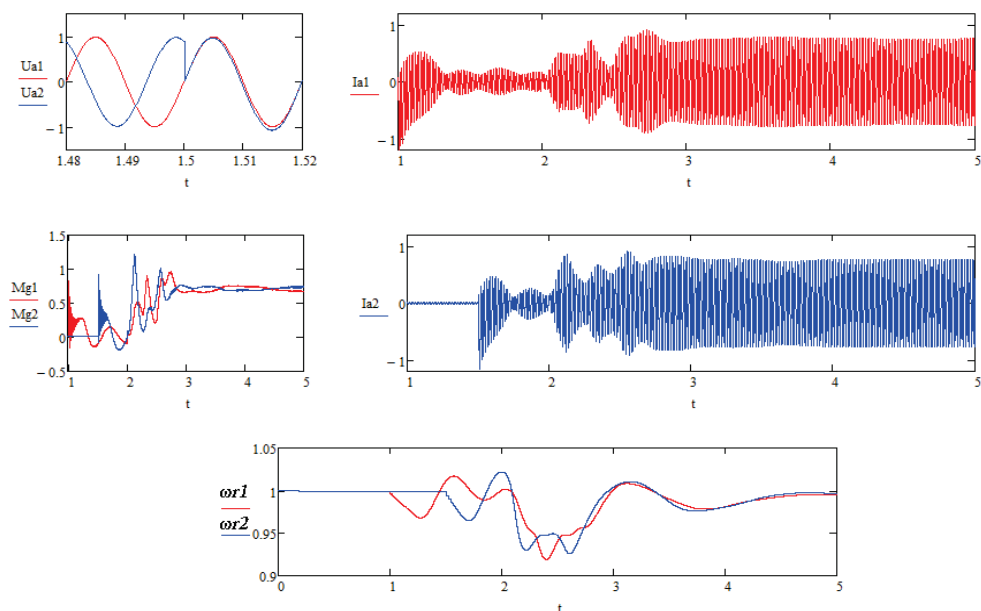


Рис. 4. Результати моделювання: $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 20$, $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1,06$

Експериментальне дослідження

Для підтвердження достовірності результатів моделювання проведені пасивні експериментальні дослідження в процесі функціонування електростанції порома за різних режимів його роботи.

Контрольно-вимірювальний комплекс на основі цифрового двоканального осцилографа і ком-

п'ютера зафіксував велику кількість осцилограм струмів генераторів, їх фазних напруг і потужностей [6]. На рис. 5 зображена осцилограма струмів двох паралельно працюючих у сталому режимі генераторів, з якої однозначно видно існування обмінних коливань потужності.

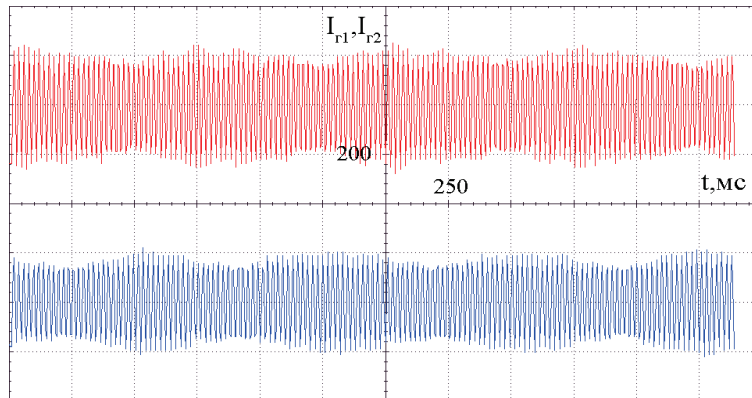


Рис. 5. Осцилограма струмів генераторів у сталому режимі

Висновки

У разі паралельної роботи синхронних генераторів у складі суднової електростанції порому «Сйськ» виникають обмінні коливання потужності, підставою яких є «люфт» в регуляторах частоти обертання дизелів. Результати математичного моделювання збіглися з результатами експериментального дослідження і підтвердили наявність і причини виникнення обмінних коливань. Дослідження, проведені за допомогою математичної моделі, свідчать про те, що для зменшення обмінних коливань необхідна система автоматичного управління, яка буде координувати роботу регуляторів частоти обертання дизелів у разі виникнення обмінних коливань шляхом зменшення коефіцієнта посилення регуляторів з одночасним збільшенням сигналу задання частоти обертання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М. : Машиностроение, 2005 г. — 512 с.
2. Вишне夫斯基 Л. В. Управление параллельной работой современных судовых многогенераторных электростанций / Л. В. Вишне夫斯基, И. П. Козырев, А. Е. Савенко // Судовые энергетические установки. — 2007. — Вып. 19. — С. 87—91.
3. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / [Л. В. Вишне夫斯基, А. М. Веретенник, Н. И. Муха, И. П. Козырев] // Електромашинобудування та електрообладнання. — 2006. — Вып. 66. — С. 201—204.
4. Вишне夫斯基 Л. В. Моделирование судовых многогенераторных установок / Л. В. Вишне夫斯基, А. Е. Савенко // Автоматика 2008 : матер. 15 междунар. конф. по автоматическому управлению. — С. 93—95.
5. Костинюк Л. Д. Моделирование электроприводов / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. — Львів : вид-во Національного Університету «Львівська політехніка», 2004 г. — 404 с.
6. Савенко О. Є. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / О. Є. Савенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 3. — С. 58—62.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 30.11.12
Рекомендована до друку 6.12.12

Савенко Олександр Євгенійович — старший викладач кафедри електроустаткування суден і автоматизації виробництва.

Керченський державний морський технологічний університет, Керч