



УДК 621.43.052:629.7.064

СИСТЕМА УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ З АСИНХРОННИМ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ

Вороненко С.В., Даник В.В.

Херсонська державна морська академія

В статті проведено аналіз роботи комбінованого газотурбінного наддуву дизелів. Показана доцільність вживання таких систем на судах. Проте, необхідно ширше провести дослідження їх роботи при перехідних режимах дизеля. Показана актуальність вживання в даних системах асинхронних машин з перетворювачем частоти. При цьому асинхронна машина має бути з масивним ротором, і забезпечувати привід компресора при пуску дизеля і його роботи на малому газі. У останніх режимах, машина повинна працювати генератором з перетворювачем частоти, який повинен забезпечити стабілізацію напруги і частоти при усіх режимах дизеля.

Ключові слова: асинхронний турбогенератор, утилізація тепла на судових дизелях, електроенергетичні системи.

Вступ. Розвиток сучасних морських суден різного призначення характеризується вирішенням питань, спрямованих на удосконалення двигунів і суден у цілому, економії палива, повноти використання його енергії, застосування оптимізованих режимів роботи енергетичних установок, автоматизації виробничих процесів, впровадження сучасних систем навігації й управління.

Успішне вирішення більшості з відзначених завдань неможливо без надійного та безперебійного живлення обладнання суден електроенергією відповідної якості. При цьому зростання рівня автоматизації судових систем, упровадження сучасних систем управління та навігації, супроводжується зростанням потужності судових електроенергетичних систем (СЕЕС) [1].

Широке впровадження на судах електричної енергії обумовлено також її універсальністю, тобто можливістю її використання практично в будь-яких системах, простота передачі та розподіл між приймачами, можливість 2-х, 3-х кратного й більше дублювання живлення окремих систем. У зв'язку з цим, у сучасній судовій електроенергетиці особливу увагу приділяють удосконаленню систем генерування електроенергії, підвищенню якості електроенергії, економічності її виробітки, надійності роботи систем та живлення приймачів електроенергії.

З освоєнням виробництва транзисторів та транзисторних модулів великої потужності одним з основних напрямків удосконалення автономних систем електропостачання та систем електроприводу являється розробка й впровадження систем з напівпровідниковими перетворювачами різного призначення в тому числі й систем з перетворювачами змінного струму змінної частоти в змінний струм постійної частоти.

При впровадженні на судах перетворювачів частоти змінного струму значно спрощується створення СЕЕС з використанням у якості первинного джерела електроенергії валогенератора змінного струму змінної частоти, гідність яких достатньо відомі. Крім того, на сьогодні розвивається метод використання тепла відпрацьованих газів шляхом установки турбокомпресорних систем (ТКС), у яких енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, що передає енергію на привод гребного гвинта, або на привод електрогенератора. У цьому випадку застосування перетворювача значно спрощує вирішення питань утилізації тепла відпрацьованих газів та відповідно підвищення ефективності ГЕУ.

Актуальність досліджень. Аналіз сучасних систем утилізації тепла вихлопних газів показує, що їх режими й умови роботи вибираються без обліку особливостей роботи та режимів СЕУ й СЕЕС. Так, режими роботи турбогенераторів, як правило, вибираються без обліку особливостей і режимів роботи газотурбінного наддування судових дизелів. У зв'язку із цим, практично у всіх випадках виникають проблеми із забезпеченням наддування при пуску двигунів, їх роботі на режимах малого ходу, а також на режимах



при надлишковій потужності турбіни. Разом з тим, при виконанні системи наддування й утилізації тепла вихлопних газів у відповідності зі схемою, представленою на рис. 1, відзначені проблеми вирішуються відносно просто.

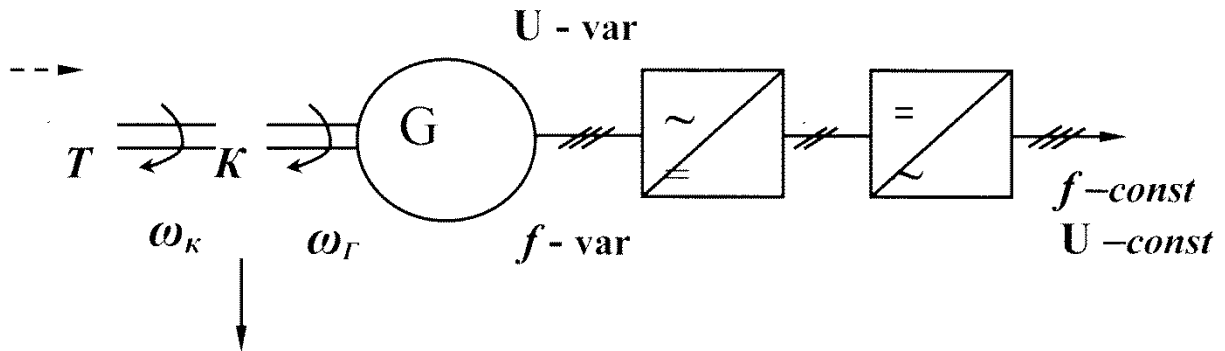


Рисунок 1 – Схема газотурбінного наддування з генератором і перетворювачем частоти

Це може бути досягнуте за рахунок відповідного зміни режиму роботи генератора з перетворювачем частоти. У режимі пуску двигуна й на малому ходу наддування здійснюється переключенням генератора в режим двигуна при його харчуванні від суднової СЕЕС.

Як приклад таких систем можна привести морський гібридний турбокомпресор для виробництва електроенергії розробки «Mitsubishi» (Японія), представлений на рис. 2.

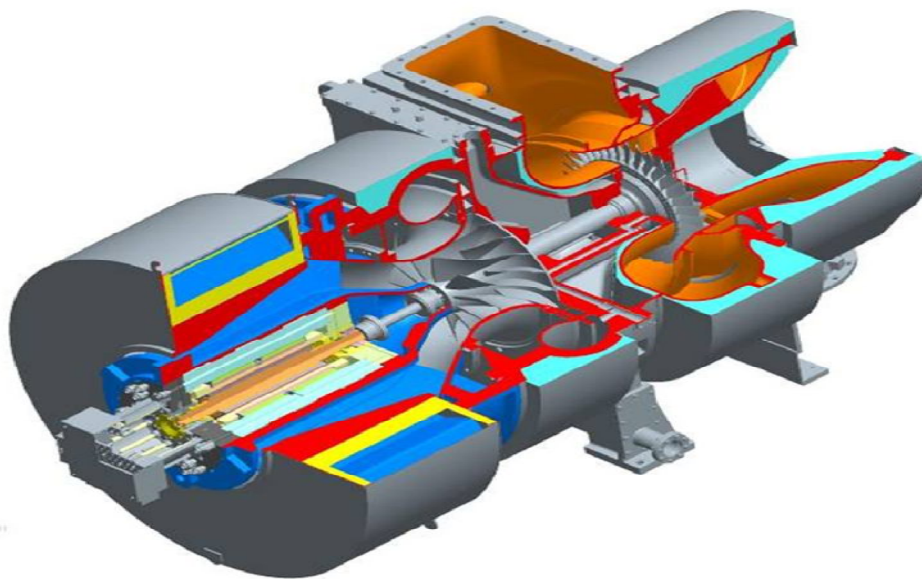


Рисунок 2 – Турбокомпресор наддування з електричним генератором

Слід відмітити, що в таких системах проблемними являються питання забезпечення надійності роботи електричної машини при високих температурах навколишнього середовища й відносно складних системах охолодження. Підвищити надійність роботи таких систем можна за рахунок застосування тільки електричного генератора з приводом від турбіни.

Представленому на рис. 2 у якості генератора використовується генератор з постійними магнітами. При цьому ротор генератора виконаний на основі магнітів з рідкоземельними елементами. При цьому проблемним є забезпечення механічної міцності ротора при високих частотах обертання, а також складність регулювання вихідної напруги. Крім того, до недоліків таких машин варто віднести високу вартість постійних магнітів. Необхідно відзначити також і те, що установка генератора на одному валу з турбіною і компресором призводить до збільшення моменту інерції обертівих



максимально збільшення постійних часу турбокомпресора, і відповідно погіршення його динамічних характеристик, що може призвести до нестійкої роботи дизеля при перехідних режимах.

Мета роботи – провести аналіз впливу генератора комбінованого турбокомпресора наддуву на динамічні характеристики двигуна, а також дати рекомендації з вибору типу генератора зазначеного агрегату.

Результати дослідження. Як відомо, динамічні властивості дизеля з автономним газотурбінним наддувом як об'єкта регулювання описуються наступними рівняннями:

$$T_g \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \sigma = K_1 \cdot \mu - K_2 \cdot \varphi + K_3 \cdot \rho;$$

$$T_k \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} + \sigma_k = K_h \cdot \mu - K_\varphi \cdot \varphi + K_\rho \cdot \rho.$$

де T_g , T_k – постійні часу двигуна і турбокомпресора; σ – швидкість зміни частоти часу вала двигуна в перехідному процесі; K_1 – коефіцієнт посилення по керуючому впливу; K_2 – коефіцієнт посилення двигуна за навантаженням; K_3 – коефіцієнт посилення по тиску наддуву; μ – відносний ефективний момент дизеля; φ – відносний кут повороту вала; ρ – відносний тиск наддуву; σ_k – частота обертання компресора; K_h , K_φ , K_ρ – коефіцієнти підсилення турбокомпресора по керуючому впливу, по зміні частоти обертання вала, по зміні тиску повітря.

Постійні часу T_g та T_k і пропорційні моментам інерції обертових мас двигуна і турбокомпресора. Інерційність турбокомпресора при зміні режимів роботи двигуна істотно впливає на стійкість його роботи. Так, наприклад при збільшенні подачі палива відбувається відставання збільшення подачі повітря в двигун в наслідок чого виникає димність, а в окремих випадках і зупинка двигуна. Крім цього, при різкому збільшенні подачі палива природно збільшується температура газів і їх питомий об'єм, що може викликати помпаж компресора.

Помпаж компресора може виникати і при збільшенні навантаження двигуна, коли частота обертання вала зменшується. Тому для поліпшення динамічних характеристик двигуна необхідно вважати інерційність турбокомпресора [1, 2], а керуючі впливу двигуна були узгоджені з характеристиками системи наддуву. Застосування генератора у складі турбокомпресора призводить до збільшення його інерційності, відповідно, погіршує динамічні параметри дизеля. Крім того, як впливає з характеристик, які представлені на рис. 3, зміна потужності генератора призводить до досить значної зміни параметрів компресора.

У зв'язку з цим в даних системах доцільно у якості генератора застосовувати асинхронний генератор з масивним феромагнітним ротором.

До основних достоїнств генератора з масивним ротором можна віднести:

- підвищену в порівнянні зі звичайним ротором термічну стійкість;
- простоту конструкції;
- кращі балансувальні й вібро-шумові показники.

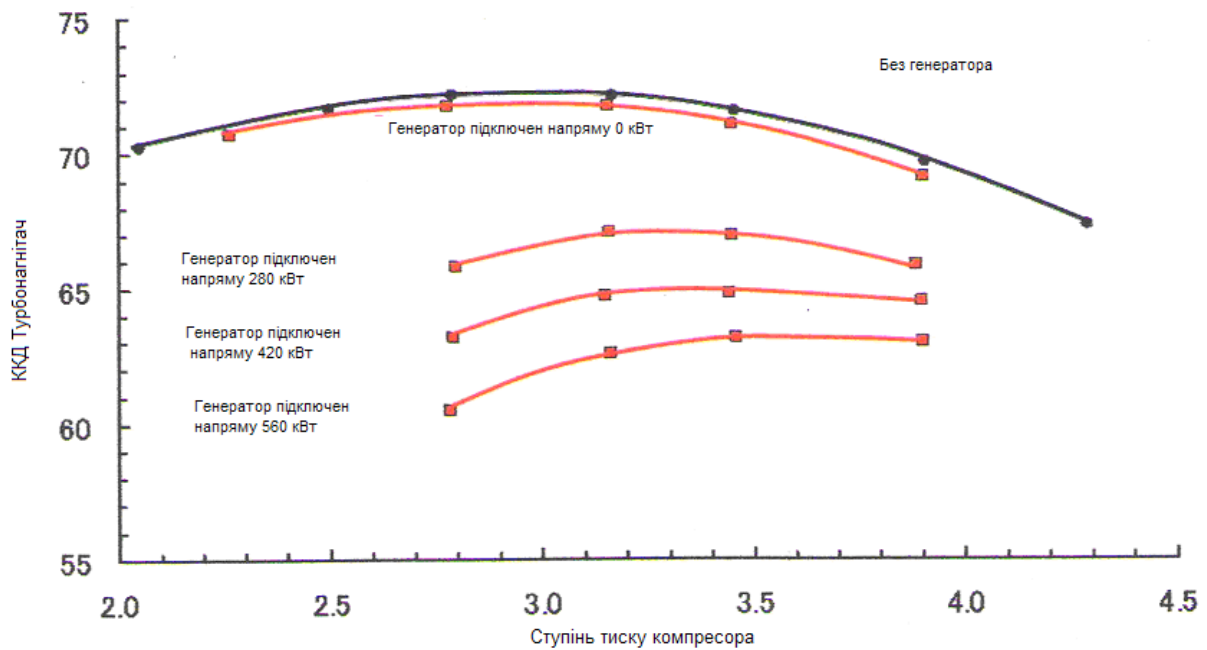


Рисунок 3 – ККД гібридного турбонагнетателя при проведенні незалежних досліджень

Істотним недоліком генератора є низькі енергетичні показники η і $\cos\varphi$, що обумовлене підвищеним значенням параметрів вторинного ланцюга.

Найбільш ефективний спосіб поліпшення параметрів феромагнітного ротора при збереженні його специфічних особливостей – покриття ротора струмопровідним напиленням (звичайно міддю). Обміднення феромагнітного ротора дозволяє зменшити як активний, так і індуктивний опір вторинного ланцюга, а отже, поліпшити пускові й робочі характеристики двигуна. У цей година крім обміднення ротора можна застосовувати нанесення поверхневого шару із застосуванням нанотехнологій, що значно підвищує показники таких машин.

Згідно [3] в даний час створено матеріал з питомим електричним опором матеріалу ρ , причому межі значень ρ можуть змінюватися від 0 (надпровідність) до $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (срібло), $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (мідь), 10^{-7} Ом·м (залізо), а за наявності нано структур в матеріалі – до $(0,4-1,2) \cdot 10^8$ Ом·м.

Одним із проблемних питань застосування асинхронних генераторів, є забезпечення самозбудження генераторів і власне регулювання їх напруги. Самозбудження автономно працюючих генераторів забезпечується за рахунок конденсаторів включених паралельно обмотці статора.

Враховуючи, що, у розглядаємій системі генератор працює на перетворювач частоти, отже реактивна потужність буде визначатися величиною кута комутації випрямляча. Тобто, при застосуванні не керованого випрямляча можна прийняти величину кута комутації рівній не більше 30 градусів. Відповідно коефіцієнт потужності перетворювача не буде перевищуватиме рівні $\cos 15$ градусів тобто близький до 1.

Слід зазначити, що при застосуванні перетворювача частоти, регулювання вихідної напруги може забезпечуватися за рахунок застосування регульованого випрямляча, або інвертора. Враховуючи, що в таких системах електрична машина повинна працювати як в режимі генератора, і в режимі двигуна. Тоді, в якості перетворювача частоти доцільно застосовувати [4] реверсивний транзисторний перетворювач, схема якого надана на рис. 4.

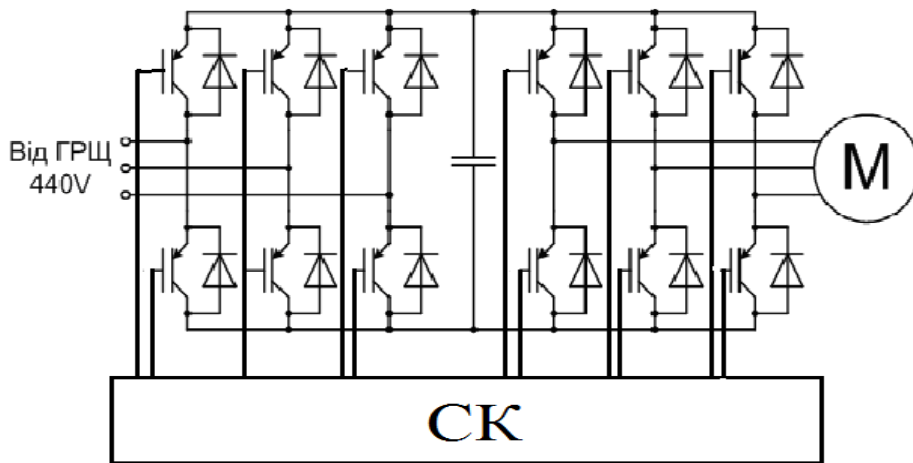


Рисунок 4 – Схема реверсивний транзисторний перетворювач

При зневазі індуктивним опором вторинного ланцюга для розрахунків характеристик генератора можна одержати наступні значення еквівалентних активного й індуктивного опорів обміненного ротора, наведені до обмотки статора:

$$R_{\varepsilon} = \frac{R_M R_C (R_M + R_C) + R_M X_C^2}{(R_M + R_C)^2 + X_C^2};$$

$$X_{\varepsilon} = \frac{R_M^2 X_C}{(R_M + R_C)^2 + X_C^2}$$

де R_C , X_C – активний і індуктивний опору феромагнітного ротора, наведені до обмотки статора; R_M – активний опір мідного покриття.

У режимі генератора для порушення необхідно встановити конденсатори, ємність яких визначається з умови роботи на ПЧ. У цьому випадку коефіцієнт потужності навантаження близьке до одиниці і ємність конденсаторів вибирається з умови самозбудження генератора й забезпечення необхідної напруги при максимальному навантаженні. Стабілізація напруги й регулювання потужності, що віддається, у даній системі забезпечується відповідним регулюванням випрямляча й інвертора ПЧ.

Розрахунки асинхронної машини з масивним ротором з урахуванням наведених рівнянь для R_{ε} , X_{ε} й R_M ротора показують, що при частоті обертання 12000 про/хв., потужності 550 кВа, частоті 400 Гц і напрузі 440/250 В маса машини становить приблизно 260 кг, номінальний момент – 370 Н·М, максимальний – 1300 Н·М при номінальному струмі 740 А. Для порушення генератора й забезпечення необхідної напруги необхідна установка конденсаторів ємністю 530 мкФ.

У даних системах наддування дизеля доцільно забезпечувати компресором з приводом від електродвигуна, що дозволить вирішити проблему наддування на малому ході, при маневрах, а також забезпечити оптимальну роботу системи наддування при усіх режимах роботи двигуна. За рахунок відповідного управління приводом компресора.

Висновки та перспективи подальшого дослідження

1. Застосування на сучасних суднах систем утилізації тепла вихлопних газів дизелів з асинхронними турбогенераторами й електроприводів компресорів дозволить підвищити економічність і надійність судових енергетичних систем, а також забезпечити оптимальний режим роботи турбіни й компресора наддуванню.

2. В якості електромашини, в комбінованому газотурбинному компресорі наддуву доцільно використовувати асинхронну машину з масивним ротором. Високі енергетичні параметри якої, можуть бути забезпечені із застосуванням виконання ротора напильням шару нано технологій.



3. Управління та регулювання електромашин і перетворення частоти в даних системах, може здійснюватися за допомогою застосування батарей конденсаторів, ємність яких, регулюється за допомогою терісторних комутаторів, керованого дроселя з обертовим магнітним полем на виході генератора, або застосуванням регульованого реверсивного випрямляча перетворювача частоти. Вибір зазначених систем, може бути зроблений на основі відповідних досліджень і розрахунків.

Необхідно провести дослідження роботи комбінованого турбогенератора наддуву в перехідних режимах роботи дизеля, а також розробити методику розрахунку асинхронної машини з двошаровим масивним ротором із застосуванням елементів нано технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пахомов Ю. А. Суднові енергетичні установки із двигунами внутрішнього згоряння / Ю. А. Пахомов. – М. : Транслит, 2007 – 528 с.
2. Корнілов Є. В. Системи газотурбінного наддування судових дизелів / Є. В. Корнілов, П. В. Бойко. – Одеса : Студія «Негоціант», 2006 – 224 с.
3. Могильників В. С. Асинхронні двигуни із двошаровим ротором / В. С. Могильників, А. М. Олейников, А. Н. Стрельников. – М., 1983.
4. Лищенко А. І. Асинхронні машини з масивним феромагнітним ротором / А. І. Лищенко, В. А. Лісник. – К. : Наукова думка, 1984 – 168 с.

Вороненко С.В., Данник В.В. СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ С АСИНХРОННЫМ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ

В статье проведен анализ работы комбинированного газотурбинного наддува дизелей. Показана целесообразность применения таких систем на судах. Однако, необходимо более широко провести исследования их работы при переходных режимах дизеля. Показана актуальность применения в данных системах асинхронных машин с преобразователем частоты. При этом асинхронная машина должна быть с массивным ротором, и обеспечивать привод компрессора при пуске дизеля и его работы на малом газе. В остальных режимах, машина должна работать генератором с преобразователем частоты, который должен обеспечить стабилизацию напряжения и частоты при всех режимах дизеля.

Ключевые слова: асинхронный турбогенератор, утилизация тепла на судовых дизелях, электроэнергетические системы.

Voronenko S.V., Danik V.V. RECOVERY SYSTEM HEAT EXHAUST MARINE DIESEL ASYNCHRONOUS TURBOGENERATORS

In the article we analyzed the work of combined gas-turbine-powered diesel supercharger. We showed the practical functionality of these systems' exploitation on the ships. However we should make more deep studies of their work upon transitional diesel engine regimes. The actuality of usage of induction machines with frequency inverter was shown. In such case the induction machine should possess the solid rotor and provide the compressor drive during the engine start, as well as its idling work. In other regimes machine should work as a frequency inverter generator which should provide the voltage and frequency stabilization at every diesel engine regime.

Keywords: asynchronous generators, heat recovery on judicial diesel, electricity system.

Статтю прийнято
до редакції 17.04.14.