УДК 621.313

https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8(49)-1399-1414

Євсєєва Наталія Олексіївна кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0002-3398-6537

Рябошапка Наталя Євгеніївна старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0003-0334-8363

Сухонос Роман Федорович магістр, старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, https://orcid.org/0000-0001-9683-3389

Грачов Павло Валентинович магістр, електромонтер, АТ «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС», м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ШВИДКІСТЮ

Анотація. Велика кількість дизельних генераторів працює при постійній частоті обертання в широкому діапазоні навантаження. Одним з перспективних технічних рішень підвищення ефективності є переведення робочого режиму дизельного генератора з постійної частоти обертання на змінну, що оптимізується за величиною електричного навантаження.

При роботі на малих навантаженнях дизельні генератори з постійною швидкістю (ДГПШ) мають невелику паливну економію та конденсацію залишків палива на стінках циліндрів двигуна, що збільшує тертя та передчасний вихід з ладу циліндрів. Одним з варіантів вирішення проблеми є врівноваження швидкості обертання дизельного двигуна до найвигіднішого режиму відповідно до механічного обертального моменту електричного генератору. Таким чином дизельні генератори зі змінною швидкістю обертання (ДГЗШ) дозволяють працювати дизельному двигуну на оптимальній швидкості відносно до навантаження, але потребують додаткового обладнання та контролю для підтримання вихідної потужності відповідно до стандартів.

Зміна робочого ритму двигуна внутрішнього згорання впливає на вихідні характеристики генератора, особливо на вихідну силу струму, необхідну для споживачів. Збільшення або зменшення навантаження споживачами потребує зміни числа обертів генератора, що в свою чергу впливає на роботу двигуна внутрішнього згорання.

Мета роботи – визначення показників роботи дизельних генераторів при постійній та змінній швидкості обертання двигуна.

Об'єкт дослідження – дизельний генератор та бензиновий генератор. Предмет дослідження – характер впливу зміни величини навантаження та зміни швидкості обертання двигуна внутрішнього згорання на характеристики роботи двигуна та генератора.

Ключові слова: електрична система, навантаження, генератор, регулятор напруги, двигун внутрішнього згорання, питома ефективна витрата палива.

Yevsyeyeva Natalya Oleksivna PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Energy Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https//orcid.org/0000-0002-3398-6537

Ryaboshapka Natalya Evgeniyevna Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Energy Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https://orcid.org/0000-0003-0334-8363

Sukhonos Roman Fedorovych MSc, Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, https//orcid.org/0000-0001-9683-3389

Grachov Pavlo Valentynovych MSc, electrician, IVCHENKO-PROGRESS JSC, Zaporizhzhia

STUDY OF PERFORMANCE AND PARAMETERS OF DIESEL GENERATORS WITH ADJUSTABLE ROTATION FREYUENCY

Abstract. A large number of diesel generators operate at a constant speed over a wide range of loads. One of the promising technical solutions to increase efficiency is to convert the operating mode of the diesel generator from a constant speed to a variable speed, which is optimized by the magnitude of the electrical load.

When operating at low loads, constant-speed diesel generators (CSDs) have poor fuel economy and condensation of fuel residues on the walls of the engine cylinders, which increases friction and premature failure of the cylinders.

One solution to the problem is to balance the speed of the diesel engine to the ideal mode in accordance with the mechanical torque of the electric generator. Thus, variable-speed diesel generators (VSDs) allow the diesel engine to operate at the optimal speed relative to the load, but require additional equipment and control to maintain the output power in accordance with the standards.

The change in the operating rhythm of the internal combustion engine affects the output characteristics of the generator, especially the output power required for consumers. An increase or decrease in the number of consumers (load) requires a change in the number of revolutions of the generator, which in turn affects the operation of the internal combustion engine. The purpose of the work is to conduct a study of the performance and characteristics of generators with adjustable speed. The object of research is a diesel generator and a gasoline generator. The subject of the study is the nature of the impact of changes in the load and rotation speed of the internal combustion engine on the performance characteristics of the engine and generator.

Keywords: electrical system, load, generator, voltage regulator, internal combustion engine, specific effective fuel consumption.

Постановка проблеми. Сьогодні в Україні існує багато галузей життєзабезпечення, які потребують резервне джерело живлення. На тлі подій, які відбуваються в країні, питання експлуатації дизельних та бензинових генераторів зі змінною швидкістю є актуальними.

Попит на автономні та гібридні електроенергетичні установки вимагає підвищення паливної економічності й якості електроенергії за умов змінних навантажень. Генератори з регульованою швидкістю, а саме дизельний асинхронний генератор з фазним ротором та синхронний генератор з постійними магнітами та суперконденсатором потенційно зменшують питомі витрати палива та емісії за рахунок узгодження швидкості двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) із поточним навантаженням. Водночас залишається невирішеним питання узагальненої оцінки продуктивності та якісних електричних характеристик у всьому робочому діапазоні швидкостей і режимів [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами аналізу літературних джерел відомо, що дизельний асинхронний генератор з фазним ротором (АГФР) широко використовуються у якості резервного джерела енергії, що підключене до мережі об'єктів споживання. При використанні режимів зі змінною швидкістю необхідно контролювати амплітуду напруги і відхилення частоти [1]. Однак регулювання вихідної напруги і частоти в системах, підключених до мережі, менш критичні, оскільки вони диктуються самою мережею [6].

Метою використання дизель-генератора на основі суперконденсатора (ДГСК) в енергосистемі є компенсація суттєвої або раптової зміни навантаження або захист мережі у разі нестачі електроенергії [1]. Однією з суттєвих переваг є мінімізація впливу коливань навантаження на дизельний двигун. Однак підготовка такої схеми з керованими випрямлячами складна і недостатня для створення постійної напруги постійного струму під час несподіваної зміни навантаження [7].

Традиційним методом задоволення різних потреб електроенергії є регулювання паливної заслінки дизельного двигуна за допомогою механічного регулятора. Однак повільна динамічна реакція дизельного двигуна призводить до високого гармонійного забруднення [8–10].

Таким чином дослідження продуктивності і характеристик генераторів з регульованою швидкістю залишається актуальним питанням.

Мета статті – визначення показників роботи дизельних генераторів при постійній та змінній швидкості обертання двигуна.

Виклад основного матеріалу. Звичайні дизельні генератори (ДГ) повинні працювати з постійною швидкістю 1500 хв$^{-1}$, щоб забезпечити постійну частоту 50 Гц. Електроспоживачі, підключені до мережі, що живляться від генераторних установок з фіксованою швидкістю, завжди стикаються з низькою ефективністю через коливання електричних навантажень із боку попиту. Існує величезна різниця між піковим навантаженням, низьким навантаженням та навіть базовим навантаженням [1–2].

У типовій енергосистемі, щоб уникнути будь-якого зниження навантаження, параметри дизельного генератора постійної швидкості (ДГПШ) засновані на пікових навантаженнях. В результаті надійність системи підвищується, і ДГПШ може підтримувати попит на електроенергію у будь-який час. З іншого боку, швидкість обертання дизельного двигуна залишається майже постійною під час низьких електричних навантажень, що є основною причиною низької ефективності дизеля [3].

Швидкість та механічний крутний момент дизельного двигуна − два параметри, що впливають на загальну ефективність ДГПШ. Вони контролюються та регулюються за кількістю палива, що впорскується в циліндр дизеля. Крутний момент дизельного двигуна відносно постійний у широкому діапазоні швидкостей, тоді як швидкість дизельного двигуна більше чутлива до зміни навантаження. Швидкість обертання впливає на витрату двигуна, коли механічне навантаження зменшується зі зміною електричного навантаження. Отже, щоб підвищити паливну ефективність системи, швидкість дизельного двигуна має синхронізуватися із зміною навантаження. Швидкість дизельного двигуна слід знижувати при низькому навантаженні електричного навантаження, щоб уникнути непотрібного механічного крутного моменту [3].

Для звичайних ДГПШ це погіршує якість виробленої вихідної потужності, тому що колінчастий вал дизельного двигуна обертається синхронно з ротором електрогенератора.

Рисунок 1 ілюструє підвищення ефективності використання дизельних регуляторів зі змінною швидкістю (ДГЗШ) в порівнянні з двигуном із фіксованою швидкістю, особливо при низьких навантаженнях [3].

Для керування дизельним генераторм та отримання в мережі потрібної частоти та величини вихідної напруги під навантаженням зі змінною швидкістю обертання ДВЗ використовують електричний метод оптимізації та механічний метод оптимізації, які в свою чергу потребують різних технічних рішень та призводять до різних економічних результатів.

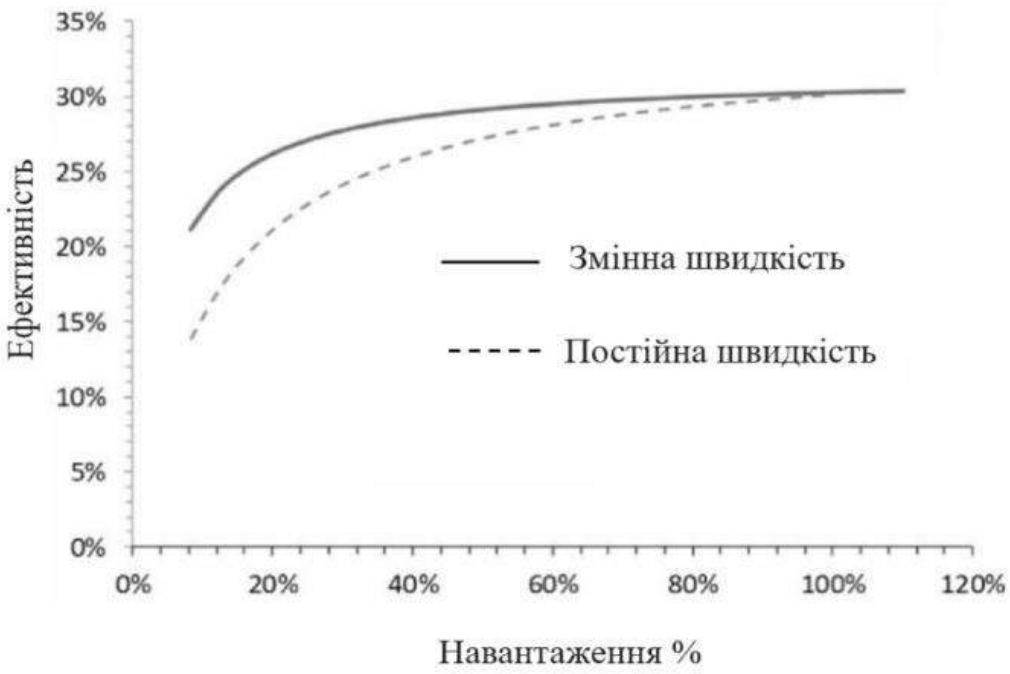

Рис. 1. Порівняльна характеристика ефективності ДГЗШ та ДГПШ

При електричному методі оптимізації параметрів, що впливають на роботу дизельних генераторів зі змінною швидкістю, швидкість обертання та вихідна напруга ДГПШ безпосередньо пов'язані. Більш того, синусоїдальна форма сигналу, створювана самим генератором, може бути спотворена через зниження швидкості дизельного двигуна або через нелінійне навантаження або коливання навантаження. Одним із методів оптимізації параметрів, що впливають на роботу ДГЗШ є метод регулювання та контролю частоти і амплітуди вихідної напруги, який полягає у використанні силової електроніки.

Існують дві різні конфігурації для з'єднання силового перетворювача з генератором змінного струму.

По-перше, при енергетичній обробці використовується перетворювач повної потужності, підключений до виходу генератора. У цьому способі швидкість дизельного двигуна регулюється залежно від зміни навантаження. Однак ця конфігурація продемонструвала недостатні можливості системи управління, оскільки між виходом перетворювача потужності та магнітним полем генератора немає зв'язку [8].

Натомість надійний ланцюг постійного струму підключається паралельно з двома серіями силових перемикачів для створення постійної та надійної напруги постійного струму за допомогою силових приводів. Потім потужність перетворюється на бажану напругу і частоту трифазного змінного струму за допомогою потужного широтно-імпульсного інвертора. Однак цей метод не дозволяє контролювати роботу силових перемикачів [8].

Генератор енергії та перетворювач призначені для вироблення енергії на основі розрахунку поля статора або положення ротора у іншій конфігурації. Надійна, але складна стратегія управління зробила цей метод популярним. Наприклад, у дослідженні, дизельний генератор з регульованою швидкістю використовує інвертор з широко-імпульсним живленням.

Цей інвертор інтегрований з генератором і об'єднує обмотки статора з валом ротора для регулювання магнітного потоку ротора в залежності від коливань навантаження. Величина напруги, що виробляється, контролюється за допомогою орієнтації потоку статора (рисунок 2) [8].

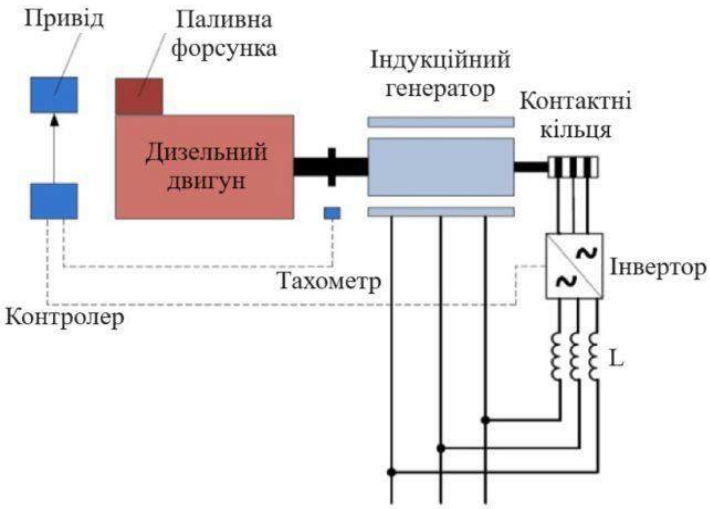

Рис. 2. Дизельний двигун зі змінною частотою обертання та індукційним генератором з подвійним живленням

У цій топології зміна швидкості дизельного двигуна залежить від потужності зустрічно-зворотнього перетворювача і може охоплювати той самий діапазон режимів роботи, що й перший метод.

ДГЗШ з використанням перетворювача потужності знижує витрату палива від 20 % до 50 % [4]. Відповідно, це підвищує ефективність системи, знижує викиди парникових газів та покращує згоряння палива. Плата за технічне обслуговування знижується в міру зменшення кількості пошкодження циліндрів, характерних для роботи двигуна в режимі малого навантаження.

При механічному методі оптимізації параметрів, що впливають на роботу дизельних генераторів зі змінною швидкістю, ДГПШ складається з двох основних компонентів: дизельного двигуна та електричного генератора. Температура навколишнього середовища, якість палива, упорскування повітря та зміна навантаження − основні параметри, що впливають на роботу ДГПШ. Робота ДГПШ поза заданими значеннями цих параметрів може призвести до високої витрати палива, підвищенню загальної вартості обслуговування двигуна, вироблення неякісної електроенергії.

Доступні механічні методи для максимізації ефективності ДГПШ. Залежно від зміни цих параметрів багатоциліндрове запалювання або керування відключенням циліндрів продовжить термін служби двигуна та оптимізує паливний профіль двигуна в порівнянні з традиційними конфігураціями.

Зміна навантаження є найважливішим параметром, який суттєво впливає на роботу та продуктивність дизельного двигуна. Механічний перетворювач або маховик використовуються для підвищення ефективності ДГПШ за умов змінного навантаження [11].

Механічні методи, аналізовані в цій статті, широко використовуються в промисловому секторі. Ці методи зосереджені на дизельному двигуні, наприклад, підтримці фіксованої швидкості на валу електричного генератора, і не вимагають силової електроніки для стабілізації частоти та амплітуди напруги.

Порівняємо техніко-економічні аспекти дизельних генераторів зі змінною швидкістю. Дизельний двигун працює з постійною швидкістю у звичайному ДГПШ, щоб забезпечити певний механічний крутний момент для генератора електроенергії без перевірки зміни електричного навантаження чи ефективності двигуна.

ДГЗШ усуває згадані вище обмеження та адаптує роботу, наприклад, для підвищення ефективності, в той час як попит та пропозиція, як і раніше, збалансовані. Рисунок 3 ілюструє порівняння продуктивності ДГЗШ та звичайного ДГ у різних кліматичних умовах [12].

Розглянемо економічні аспекти. Як видно з рисунку 3, витрата палива дизель-генератора з фіксованою частотою обертання вище, ніж у ДГЗШ при зменшенні навантаження. У дослідженні, профіль питомої витрати палива на гальмо для ДГПШ різко збільшується, коли електричне навантаження складає

30…40 % від повного навантаження, в той час як для ДГЗШ він залишається майже постійним, коли швидкість дизельного двигуна знижується та синхронізується з навантаженням. Тому що ДГЗШ дозволяє працювати дизельному двигуну на найбільш ефективній швидкості в залежності від навантаження очікуються підвищена паливна економічність (залежно від характеристики навантаження); збільшення ресурсу двигуна; збільшення часу між кожним капітальним ремонтом двигуна.

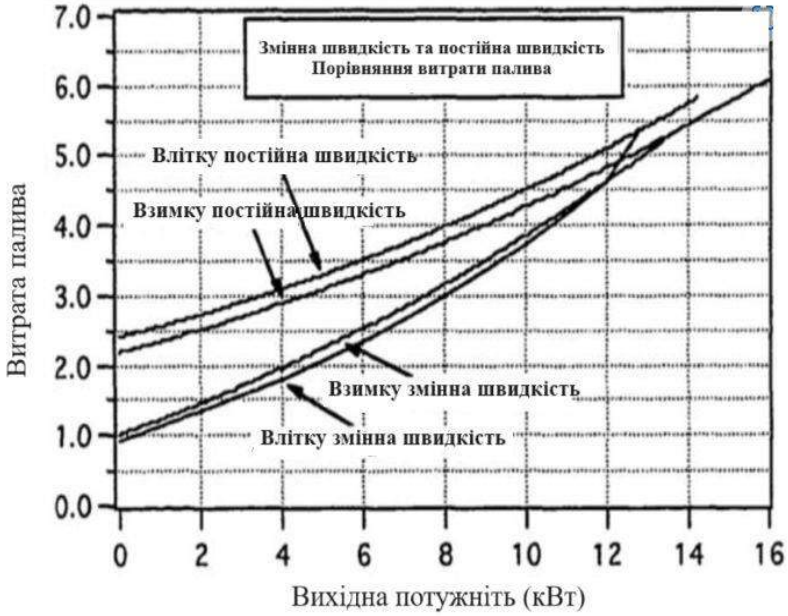

Рис. 3. Залежність вихідної потужності від витрати палива ДГЗШ та ДГПШ у різних кліматичних умовах

Величина струму, споживаного генератором, варіюється в залежності від величини навантаження, у той час як напруга та частота повинні залишатися постійними. У генераторі полюса статора поглинають більше магнітного потоку від обмоток ротора під час пікових навантажень. Отже, механічний крутний момент, прикладений до валу ротора, неминуче збільшиться для підтримки фіксованої швидкості, необхідної для фіксованої частоти та амплітуди напруги. Колінчастий вал дизельного двигуна, з'єднаний з ротором електрогенератора, повинен забезпечувати достатній крутний механічний момент для підтримки якості електроенергії.

Однак у міру зменшення навантаження ДГПШ колінчастий вал дизельного двигуна буде підтримувати фіксовану швидкість при нижчому крутному моменті, що призводить до зниження ефективності роботи.

ДГЗШ врівноважує роботу енергосистеми, щоб уникнути надмірного механічного крутного моменту при низькому навантаженні та підвищити

ефективність системи. У ДГЗШ дизельний двигун, який забезпечує механічний крутний момент для електрогенератора, сповільнюється при низькому споживанні електроенергії. Ця стратегія економить паливо за рахунок наближення швидкості дизельного двигуна до оптимальної для утворення необхідного крутного моменту.

Рисунок 4 ілюструє, адаптацію крутного моменту і швидкісті двигуна для оптимізації паливної економічності.

Рис. 4. Характеристики дизельного двигуна, що пов'язані з двохполюсним генератором

Для порівняння різних вищерозглянутих методів вибираються на основі описаних у літературі прикладів чотири різні групи застосування електоенергії, у яких теоретичні вимоги зазвичай стикаються з практичними проблемами (таблиця 1).

Таблиця 1

Застосування електроенергії

Категорії	
Група 1	Генератори підключені до мережі
Група 2	Робота в ізольованому режимі з підключенням при низькому навантаженні
Група 3	Швидке коливання навантаження
Група 4	Інтеграція в гібридну систему

На рисунку 5 показано результати порівняння ДГЗШ для чотирьох груп застосування електроенергії [1]. З гістограми (рисунок 5) видно, що ДГСК продемонстрував швидку реакцію в разі раптової різкої зміни навантаження. Суперконденсатор, з'єднаний з акумуляторною системою зберігання, компенсує необхідну потужність для споживачів.

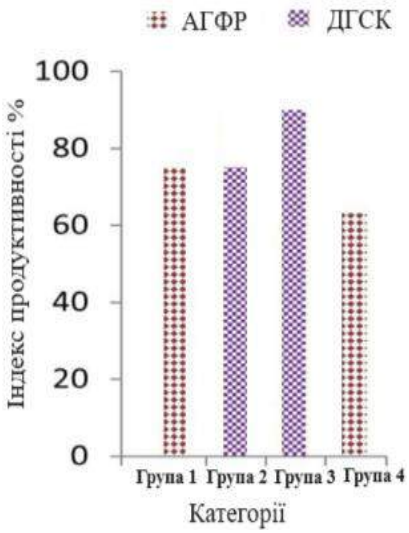

Рис. 5. Порівняння продуктивності трьох методів керування ДГЗШ

Індекс продуктивності демонструє застосування ДГЗШ на основі обраних критеріїв. Для споживачів підключених до мережі, АГФР продемонстрували високу економію палива та низькі експлуатаційні витрати. Ці рішення можуть вирішити такі технічні проблеми, як регулювання частоти чи стабільність енергосистеми. Для порівняння продуктивності дизельних генераторів зі змінною швидкістю в енергосистемі у таблиці 2 запропоновано три важливі фактори, на які може вплинути використання типового ДГЗШ. Увагу приділимо коефіцієнту якості електроенергії. Для розуміння електромагнітних явищ і регулювання результатів вимірювань важливо класифікувати порушення якості електроенергії [13].

Таблиця 2

Вплив інтеграції конструкцій ДГЗШ

Конструкції	Відхилення частоти, %		Заощадження палива, %		Зниження загальних коливань, %	
ДГСК	2	4	35	30	3	15
АГФР	3	6	30	25	5	7
Мережа	ПМ	ВМ	ПМ	ВМ	ПМ	ВМ

Примітка: ПМ – підключено до мережі, ВМ – поза мережею

Найбільш поширені проблеми з якістю електроенергії виникають у вигляді стрибків напруги, гармонійних спотворень, дисбалансу напруги, коливань напруги тощо [14–17]. Невизначена швидкість ротора, незбалансоване підключення навантажень, складні перетворювачі потужності та тривалі несправності мережі призводять до низької якості електроенергії або високих спотворень гармонік. Точніше, електроенергія низької якості виробляється, якщо швидкість системи генерації коливається або коли виникають електричні коливання зі сторони споживача [18].

Також однією з основних причин використання дизельного двигуна на змінній швидкості є оптимізація витрати пального двигуном. Жорстка конкуренція між виробниками дозволяє використовувати високоефективні генераторні установки для промислового та житлового секторів. Ці генераторні установки мають різні конструкції, які згадані вище, хоча більшість із них мають той самий принцип (електричний перетворювач), але з різними стратегіями управління. Щоб отримати мінімальну витрату палива при кожному методі регулювання швидкості, опорну швидкість слід регулювати з урахуванням коливань навантаження. Причина цієї стратегії полягає в тому, що реакція двигуна адаптується швидше з розпізнаною картою навантаження.

Нелінійні методи керування швидкістю покращують паливний профіль двигуна за рахунок обліку продуктивності та вантажопідйомності двигуна. На рисунку 6 представлено середню витрату палива двигунами різних конструкцій із регульованою швидкістю як підключених до мережі, так і до окремих споживачів. Оптимальна крива швидкості, показана на рисунку 6, є кращою областю, де двигун працює ефективно [19].

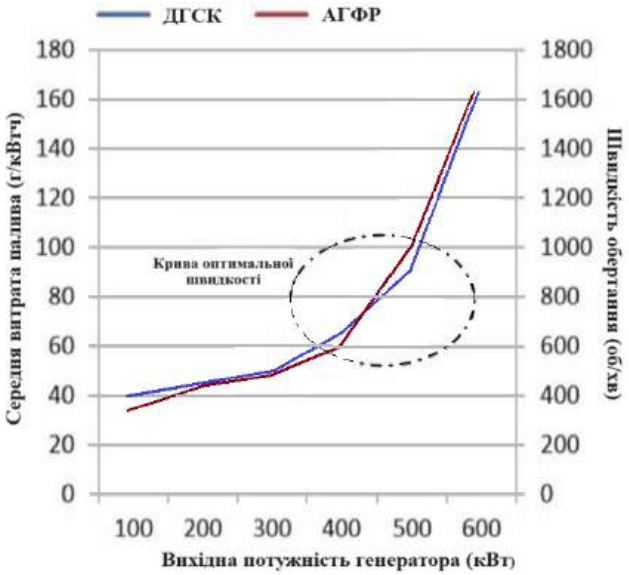

Рис. 6. Порівняння споживання палива ДГЗШ

Висновки. Кожен метод ДГЗШ має свої переваги та недоліки, які роблять його кращим для конкретного застосування, проте не обов'язково для всіх. Оцінюють наскільки кожна конструкція ДГЗШ підходить для чотирьох різних умов експлуатації: генератор з підключенням до мережі, ізольований режим роботи генератора з низьким навантаженням, швидке коливання навантаження та інтеграція генератора у гібридну систему. Генераторам, підключеним до мережі, за індексом продуктивності найбільше підходить АГФР.

Важливим параметром, який необхідно контролювати є повна потужність. ДГСК і АГПЖ з регульованою швидкістю, можливо, не є найкращим варіантом для кожного застосування, але вони здатні достатньо адаптуватися як до підключеної до мережі, так і до ізольованої роботи. Низька плата за обслуговування та висока економія палива зробили ці системи популярними.

АГФР більш ефективний для споживачів, підключених до мережі або у поєднанні з іншими відновлюваними джерелами енергії, оскільки його динамічний відгук повільний і може витримувати раптові великі зміни навантаження. Однак АГФР може знизити витрати пального та забруднення навколишнього середовища в режимі очікування або автономної роботи великих дизель-генераторів до 20…40 МВт. Більше того, при потужності менше 1,5…2 МВт на одиницю використання АГФР не виправдане з погляду співвідношення ціни та продуктивності в порівнянні з синхронними перетворювальними системами повної потужності або асинхронними генераторними системами із короткозамкненим ротором. Крім того, перетворювач потужності, встановлений за статором машини, покращує якість електроенергії. Отже, конденсатори перетворювача можуть забезпечувати струм намагнічування для самої машини. Така конфігурація зменшує пульсації, що виходять із електромережі.

Література:

1. Mobarra M., Rezkallah M., Ilinca A. Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison // Energies. 2022. 15(2). 592 p. DOI: 10.3390/en15020592

2. Waris T., Nayar C. V. Variable speed constant frequency diesel power conversion system using doubly fed induction generator (DFIG) // In Proceedings of the 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 15–19 June 2008. P. 2728–2734. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592357

3. Hamilton J., Negnevitsky M., Wang X. The potential of variable speed diesel application in increasing renewable energy source penetration // Energy Procedia, February 2019. Vol. 160. P. 558–565. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.206

4. Hamilton J., Negnevitsky M., Wang X. Low load diesel perceptions and practices within remote area power systems // In Proceedings of the 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), Vienna, Austria, 8–11 September 2015. P. 121–126. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315194

5. Kawabata Y., Oka T., Ejiogu E., Kawabata T. Variable speed constant frequency standalone power generator using wound-rotor induction machine // In Proceedings of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, China, 14–16 August 2004. Vol. 3. P. 1778–1784.

6. Pena R., Cardenas R., Proboste J., Clare J., Asher, G. M. A hybrid topology for a variable speed wind-diesel generation system using wound rotor induction machines // In Proceedings of the 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005, Raleigh, NC, USA, 6–10 November 2005. P. 6.

7. Yin C., Sechilariu M., Locment F. Diesel generator slow start-up compensation by supercapacitor for DC microgrid power balancing // In Proceedings of the 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium, 4–8 April 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514058

8. Lee J.-H., Lee S.-H., Sul S.-K. Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // IEEE Trans. Ind. Appl. 2009. 45(6). P. 2130–2135. DOI: 10.1109/TIA.2009.2031891

9. Crispo R.; Brekken T. K. A. A motor-generator and supercapacitor based system for microgrid frequency stabilization // In Proceedings of the 2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Portland, OR, USA, 1–2 August 2013. P. 162–166.

10. Leuchter J., Bauer P., Zobaa A. F., Bojda P. An interface converter of hybrid power sources with supercapacitors // In Proceedings of the IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Glendale, CA, USA, 7–10 November 2010. P. 3250–3257.

11. Gosala D. B., Allen C. M., Ramesh A. K., Shaver G. M., McCarthy J., Stretch D., Koeberlein E., Farrell L. Cylinder deactivation during dynamic diesel engine operation // International Journal of Engine Research. 2017, Vol. 18 Issue 10. P. 991–1004. DOI: 10.1177/14680874176940

12. Марченко А. П., Рязанцев М. К., Шеховцов А. Ф. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків : Прапор, 2004. 288 с.

13. More T. G., Asabe P. R., Chawda S. Power quality issues and it's mitigation techniques // Int. Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, Suue 4. P. 170–177.

14. El Sebaay A., Ramadan M., Abu Adma M.A. Studying the Effect of Non-Linear Loads Harmonics on Electric Generator Power Rating Selection // European Scientific Journal. 2017. Vol. 13. № 18. P. 548–561. DOI: 10.19044/esj.2017.v13n18p548

15. Munir H. M., Ghannam R., Li H., Younas T., Golilarz N. A., Hassan M., Siddique A. Control of Distributed Generators and Direct Harmonic Voltage Controlled Active Power Filters for Accurate Current Sharing and Power Quality Improvement in Islanded Microgrids // Inventions. 2019. 4(2). 27 p. DOI: 10.3390/inventions4020027

16. Управління аварійними генераторами з нелінійними навантаженнями. URL: https://www.kohler-sdmo.com/FR/Documents/download/124

17. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В., Сосик А. Ю., Щербина А. В. Транспортні енергетичні установки : навчальний посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 264 с.

18. Grzesiak L., Koczara W., Pospiech P., da Ponte M. Power quality of the Hygen autonomous load-adaptive adjustable-speed generating system // In Proceedings of the APEC '99. Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285), Dallas, TX, USA, 14–18 March 1999. Vol. 2. P. 945–950. DOI: 10.1109/APEC.1999.750483

19. Approximate Diesel Fuel Consumption Chart. URL: https://www.generatorsource.com/Diesel_Fuel_Consumption.aspx

20. Joshi D., Sandhu K., Soni M. Constant Voltage Constant Frequency Operation for a Self-Excited Induction Generator // IEEE Trans. Energy Convers. 2006. 21(1), P. 228–234. DOI: 10.1109/TEC.2005.858074

21. Leuchter J., Bauer P., Bojda P., Rerucha V. Bi-directional DC-DC converters for supercapacitor based energy buffer for electrical gen-sets // In Proceedings of the 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2–5 September 2007. P. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417437

22. Manwell J., Stein W., Rogers A., McGowan J. An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems // Renewable Energy. 1992. Vol. 2, Issue 6. P. 563–571. DOI: 10.1016/0960-1481(92)90019-Y

23. Сажко В. А. Електрообладнання автомобілів і тракторів: Підручник. Київ : Каравела, 2009. 400 с.

24. Грачов П. В. Дослідження продуктивності і характеристик генераторів з регульованою швидкістю: магістерська робота. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. 60 с.

25. Рябошапка Н. Є., Грачов П. В. Аналіз впливу навантаження генератора на ефективні показники автомобільного двигуна внутрішнього згорання // Тиждень науки: щорічна науково-практична конференція, 24-28 квітня 2023 р.: тези доп. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. С. 81–83.

References:

1. Mobarra, M., Rezkallah, M., Ilinca, A. (2022). Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison // *Energies*. 15(2). 592 p. DOI: 10.3390/en15020592 [in English].

2. Waris, T., Nayar, C. V. (2008). Variable speed constant frequency diesel power conversion system using doubly fed induction generator (DFIG) // In Proceedings of the *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, 15–19 June 2008. P. 2728–2734. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592357 [in English].

3. Hamilton, J., Negnevitsky, M., Wang, X. (2019). The potential of variable speed diesel application in increasing renewable energy source penetration // *Energy Procedia*, February 2019. Vol. 160. P. 558–565. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.206 [in English].

4. Hamilton, J., Negnevitsky, M., Wang, X. (2015). Low load diesel perceptions and practices within remote area power systems // In Proceedings of the *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies* (EDST), Vienna, Austria, 8–11 September 2015. P. 121–126. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315194 [in English].

5. Kawabata, Y., Oka, T., Ejiogu, E., Kawabata, T. (2004). Variable speed constant frequency standalone power generator using wound-rotor induction machine // In Proceedings of the *4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Xi'an, China, 14–16 August 2004. Vol. 3. P. 1778–1784. [in English].

6. Pena, R., Cardenas, R., Proboste, J., Clare, J., Asher, G. M. (2005). A hybrid topology for a variable speed wind-diesel generation system using wound rotor induction machines // In Proceedings of the *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, IECON 2005, Raleigh, NC, USA, 6–10 November 2005. P. 6. [in English].

7. Yin, C., Sechilariu, M., Locment, F. (2016). Diesel generator slow start-up compensation by supercapacitor for DC microgrid power balancing // In Proceedings of the *2016 IEEE*

International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium, 4–8 April 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514058 [in English].

8. Lee, J.-H., Lee, S.-H., Sul, S.-K. (2009). Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 45(6). P. 2130–2135. DOI: 10.1109/TIA.2009.2031891 [in English].

9. Crispo, R.; Brekken, T. K. A. (2013). A motor-generator and supercapacitor based system for microgrid frequency stabilization // In Proceedings of the *2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability* (SusTech),Portland,OR, USA,1–2 August2013.P.162–166.[in Eng]

10. Leuchter, J., Bauer, P., Zobaa, A. F., Bojda, P. (2010). An interface converter of hybrid power sources with supercapacitors // In Proceedings of the *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, Glendale, CA, USA, 7–10 November 2010. P. 3250–3257. [in English].

11. Gosala, D. B., Allen, C. M., Ramesh, A. K., Shaver, G. M., McCarthy, J., Stretch, D., Koeberlein, E., Farrell, L. (2017). Cylinder deactivation during dynamic diesel engine operation // *International Journal of Engine Research*. Vol. 18 Issue 10. P. 991–1004. DOI: 10.1177/14680874176940 [in English].

12. Marchenko, A. P., Ryazantsev, M. K., Shekhovtsov, A. F. (2004). *Dvyhuny vnutrishn'oho zhorannia: Seriia pidruchnykiv u 6 tomakh. T. 2. Dovodka konstruktsiy forsovanykh dvyhuniv nazemnykh transportnykh mashyn [Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. Vol. 2. Refinement of designs of forced engines of ground transport vehicles]*. Kharkiv: Prapor, 288 p. [in Ukrainian].

13. More, T. G., Asabe, P. R., Chawda, S. (2014). Power quality issues and it's mitigation techniques // *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 4, Suue 4. P. 170–177. [in English].

14. El Sebaay, A., Ramadan, M., Abu Adma, M. A. (2017). Studying the Effect of Non-Linear Loads Harmonics on Electric Generator Power Rating Selection // *European Scientific Journal*. Vol. 13. № 18. P. 548–561. DOI: 10.19044/esj.2017.v13n18p548 [in English].

15. Munir, H. M., Ghannam, R., Li H., Younas, T., Golilarz, N. A., Hassan, M., Siddique, A. (2019). Control of Distributed Generators and Direct Harmonic Voltage Controlled Active Power Filters for Accurate Current Sharing and Power Quality Improvement in Islanded Microgrids // Inventions. 4(2). 27 p. DOI: 10.3390/inventions4020027 [in English].

16. Управління аварійними генераторами з нелінійними навантаженнями. URL: https://www.kohler-sdmo.com/FR/Documents/download/124 [in Ukrainian].

17. Artyukh, O. M., Dudarenko, O. V., Kuzmin, V. V., Sosyk, A. Yu., Shcherbyna, A. V. (2021). *Transportni enerhetychni ustanovky [Transport energy installations]*. Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 264 p. [in Ukrainian].

18. Grzesiak, L., Koczara, W., Pospiech, P., da Ponte, M. (1999). Power quality of the Hygen autonomous load-adaptive adjustable-speed generating system // In Proceedings of the APEC 99. *Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 1999 Conference Proceedings (Cat. No.99CH36285), Dallas, TX, USA, 14–18 March 1999. Vol. 2. P. 945–950. DOI: 10.1109/APEC.1999.750483 [in English].

19. Approximate Diesel Fuel Consumption Chart. URL: https://www.generatorsource.com/Diesel_Fuel_Consumption.aspx [in English].

20. Joshi, D., Sandhu, K., Soni, M. (2006). Constant Voltage Constant Frequency Operation for a Self-Excited Induction Generator // *IEEE Trans. Energy Convers*. 2006. 21(1), P. 228–234. DOI: 10.1109/TEC.2005.858074 [in English].

21. Leuchter, J., Bauer, P., Bojda, P., Rerucha, V. (2007). Bi-directional DC-DC converters for supercapacitor based energy buffer for electrical gen-sets // In Proceedings of the *2007 European*

Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2–5 September 2007. P. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417437 [in English].

22. Manwell, J., Stein, W., Rogers, A., McGowan, J. (1992). An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems // *Renewable Energy*. 1992. Vol. 2, Issue 6. P. 563–571. DOI: 10.1016/0960-1481(92)90019-Y [in English].

23. Sazhko, V. A. (2009). *Elektroobladnannia avtomobiliv i traktoriv [Electrical equipment of cars and tractors]*. Kyiv: Karavela, 400 p. [in Ukrainian].

24. Grachov, P. V. (2023). *Doslidzhennia produktyvnosti i kharakterystyk heneratoriv z rehul'ovanoiu shvydkistiu [Research on the performance and characteristics of generators with adjustable speed]* : master's thesis. Zaporizhzhia : National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 2023. 60 p. [in Ukrainian].

25. Ryaboshapka, N. E., Grachov, P. V. (2023). *Analiz vplyvu navantazhennia heneratora na efektyvni pokaznyky avtomobil'noho dvyhuna vnutrishn'oho zhorannia [Analysis of the influence of generator load on the effective indicators of an automobile internal combustion engine]* // Science Week: annual scientific and practical conference, April 24-28, 2023: abstracts. Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 2023. P. 81–83. [in Ukrainian].