

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Транспортний факультет
кафедра «Двигуни внутрішнього згорання»

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИК
ГЕНЕРАТОРІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ШВИДКІСТЮ

(STUDY OF PERFORMANCE AND PARAMETERS OF GENERATORS
WITH ADJUSTABLE ROTATION FREQUENCY)

Виконав: студент(ка) 2(м) курсу, групи T-412м
Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма (спеціалізація)

Двигуни внутрішнього згорання

ГРАЧОВ Павло Валентинович

Керівник старший викладач кафедри

«Двигуни внутрішнього згорання»

РЯБОШАПКА Наталя Євгенівна.

Рецензент професор кафедри «Металорізальні

верстати та інструменти», д.т.н. ЦИГАНОВ

Володимир Васильович

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут, факультет Транспортний факультет

Кафедра Двигуни внутрішнього згорання

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма (спеціалізація) «Двигуни внутрішнього згорання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ДВЗ

_____ Слинько Г. І.

_____ 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ГРАЧОВ Павло Валентинович

1. Тема проекту (роботи) Дослідження продуктивності і характеристик генераторів з регульованою швидкістю

керівник проекту (роботи) старший викладач кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» РЯБОШАПКА Наталя Євгенівна

затверджені наказом вищого навчального закладу від 28 листопада 2023 № 483

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) бензиновий 4-тактний 4-циліндровий двигун ВАЗ-2101 номінальною потужністю 45,6 кВт при 5600 хв⁻¹

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) обґрунтування актуальності теми дослідження; основні положення використаних методик; розглянути основні схеми та характеристики дизельних та бензинових генераторів; тепловий розрахунок двигуна ВАЗ-2101 на номінальному режимі; експериментальне дослідження впливу навантаження генератора на ефективні показники автомобільного ДВЗ; аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) В презентації до захисту надано основні відомості про роботу, схему стенду, основні формули розрахункової методики, результати досліджень в табличному та графічному вигляді

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5	Рябошапка Н.Є., ст. викладач кафедри «Двигуни внутрішнього згорання»		
1-5	Слинько Г.І., завідувач кафедри «Двигуни внутрішнього згорання»		
нормо-контроль	Слинько В.В., ст. викладач кафедри «Двигуни внутрішнього згорання»		

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	05.09.2023	
2	Аналіз літературних джерел	10.09.2023	
3	Обґрунтування актуальності дослідження	15.09.2023	
4	Описання методики дослідження	25.09.2023	
5	Розглядання та опис схем і типів дизельних та бензинових генераторів	10.10.2023	
6	Тепловий розрахунок двигуна ВАЗ-2101 на номінальному режимі	25.10.2023	
7	Експериментальне дослідження впливу навантаження автомобільного генератора на ефективні показники ДВЗ	15.11.2023	
8	Формування висновків з магістерської роботи	25.11.2023	
9	Оформлення магістерської роботи, нормоконтроль	11.12.2023	
10	Розробка презентації та доповіді до захисту	13.12.2023	
11	Подання роботи до захисту	14.12.2023	

Студент(ка)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

(підпис)

Грачов П.В.

(прізвище та ініціали)

Рябошапка Н.Є.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 59 с., 6 табл., 14 рис., 31 джерело, 2 додатка.

ЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, НАВАНТАЖЕННЯ, ГЕНЕРАТОР, РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, ДВИГУН ВУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ, ПИТОМА ЕФЕКТИВНА ВИТРАТА ПАЛИВА.

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

Мета роботи – провести дослідження продуктивності і характеристик генераторів з регульованою швидкістю.

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.

Роботу виконано в рамках держбюджетної НДР 02211 «Теплові та газодинамічні процеси в двигунах внутрішнього згорання та системах».

За результатами магістерської роботи підготовлена робота для конкурсу студентських наукових робіт НУ «Запорізька політехніка» 2023/2024 навчального року за секцією «Транспортна».

Результати роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Запорізька політехніка» підготовки бакалаврів, що навчаються за освітньою програмою «Двигуни внутрішнього згорання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

1 ЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

1.1 Схеми та принцип дії дизельних генераторів та їхні основні характеристики

1.1.1 Дизельний асинхронний генератор з фазним ротором

1.1.2 Синхронний генератор з постійними магнітами та суперконденсатором

1.2 Основні схеми та характеристики бензинового генератора

1.3 Висновки за розділом

2 ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Проблеми роботи дизельних генераторів на постійній швидкості

2.2 Переваги роботи дизельних генераторів зі змінною швидкістю

2.3 Переваги та недоліки бензинових генераторів

2.4 Висновки за розділом

3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ ПОСТІЙНІЙ ТА ЗМІННІЙ ШВИДКОСТІ

ОБЕРТАННЯ

3.1 Методи дослідження дизельних генераторів

3.1.1 Електричний метод оптимізації параметрів, що впливають на роботу дизельних генераторів зі змінною швидкістю

3.1.2 Механічний метод оптимізації параметрів, що впливають на роботу дизельних генераторів зі змінною швидкістю

3.1.3 Техніко-економічні аспекти дизельних генераторів зі змінною швидкістю

3.2 Методи дослідження бензинових генераторів

3.3 Порівняння методів роботи дизельних генераторів зі змінною швидкістю

3.3.1 Порівняння продуктивності дизельних генераторів зі змінною швидкістю в енергосистемі

3.3.2 Порівняння економії палива

3.4 Висновки за розділом

4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА ВАЗ-2101 НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

4.1 Підготовка даних для теплового розрахунку в програмі Engine Calculation

4.2 Контроль та аналіз результатів теплового розрахунку

4.3 Висновки за розділом

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВАНТАЖЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ ДВЗ

5.1 Опис випробувального стенду ДВЗ та стенду навантаження

5.2 Електричні виміри роботи генератора

5.2.1 Вплив на робочі характеристики генератора зміни навантаження електричної системи при роботі двигуна на холостому ході

5.2.2 Вплив на робочі характеристики генератора зміни навантаження електричної системи при роботі двигуна у номінальному режимі

5.2.3 Вплив на робочі характеристики генератора зміни навантаження електричної системи при роботі двигуна на максимальних обертах

5.3 Аналіз отриманих результатів

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

- ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ДГПШ – дизель-генератор з фіксованою швидкістю;
ДГЗШ – дизель-генератор зі змінною швидкістю;
АГФР – асинхронний генератор з фазним ротором;
СГПМ – синхронний генератор з постійними магнітами;
ДГСК – дизель-генератор на основі суперконденсатора;
СК – суперконденсатор;
СЗ – стан заряду;
ДГ – дизельний генератор;
ПС – постійний струм;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
кВт – кіловат;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ЦОС – головна обчислювальна система;
ФММ – фізико-математична модель;
ПКВ – кут повороту колінчатого валу, °.

ВСТУП

Сьогодні в Україні існують численні галузі життєзабезпечення, які потребують резервне джерело живлення. З оглядом на ситуацію, що склалась в країні, спостерігається широкий попит на дизельні та бензинові генератори. Як автономні джерела електроживлення вони мають певні переваги та недоліки.

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 ідеального режиму відповідно до механічного обертального моменту електричного генератора. 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.

Мета і завдання дослідження

Мета даної роботи – аналіз роботи дизельних та бензинових генераторів при постійній та змінній швидкості обертання двигуна.

Для досягнення мети вирішено ряд завдань:

- розглянули робочі характеристики дизельного та бензинового двигуна;
- розглянули технології ДГЗШ та бензинових генераторів;
- порівняли методи роботи ДГЗШ та бензинових генераторів;
- зробили тепловий розрахунок роботи бензинового двигуна;

- зробили загальне порівняння ДГЗШ;
- зробили практичне дослідження роботи бензинового двигуна внутрішнього згорання та генератора під навантаженням;
- зробили висновки та розробили рекомендації.

Об’єкт дослідження – дизельні та бензинові генераторні установки змінної швидкості.

Предмет дослідження – аналіз роботи та характеристик дизельних та бензинових генераторів зі змінною швидкістю.

Методи дослідження: теоретичні (аналіз, синтез, індукція, дедукція) та практичні (електричний та механічні методи оптимізації параметрів, що впливають на роботу ДГЗШ, експериментальне дослідження).

Генератори зі змінною швидкістю обертання дозволяють працювати двигунам з найбільш ефективною швидкістю в залежності від навантаження очікуються наступні переваги:

- підвищена паливна економія в залежності від навантаження;
- збільшення ресурсу двигуна;
- збільшення періодів між капітальними ремонтами двигуна.

Наукова новизна роботи полягає в дослідженні продуктивності та характеристик генераторів з постійною та регульованою швидкістю при зміні навантаження в мережі; встановленні алгоритмів керування на основі таких задач, як регулювання напруги та частоти, оптимізації частоти обертання двигуна, зменшення викидів до навколишнього середовища.

Практична цінність роботи полягає в використанні ефективних технологій, які значно підвищують ефективність та паливну економічність двигуна в залежності від навантаження, стабільність мережі та оптимізують витрати на електроенергію.

Роботу виконано в рамках держбюджетної НДР 02211 «Теплові та газодинамічні процеси в двигунах внутрішнього згорання та системах».

За результатами магістерської роботи підготовлена робота для конкурсу студентських наукових робіт НУ «Запорізька політехніка» 2023/2024

навчального року за секцією «Транспортна».

Результати роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Запорізька політехніка» підготовки бакалаврів, що навчаються за освітньою програмою «Двигуни внутрішнього згорання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1 ЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

Головним джерелом електричної енергії в системі енергопостачання є генератор змінного струму з випрямлячем. Вал генератора має привід від двигуна внутрішнього згорання через ремінну передачу. Спеціальний вузол генератора - випрямляч забезпечує перетворення змінного струму в постійний, якщо є така потреба.

1.1 Схеми та принцип дії дизельних генераторів та їхні основні характеристики

У цьому розділі представлені характеристики генераторів, з використанням методів, що використовуються для ДГЗШ, які дозволяють працювати зі змінною швидкістю дизельному двигуну відповідно до зміни навантаження.

1.1.1 Дизельний асинхронний генератор з фазним ротором

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 [2].

Серед різних методів керування вихідною напругою ДГЗШ, на яку

впливає зміна частоти обертання ротора, найбільш часто використовують генератори з фазним ротором. Цей тип генераторів збирається з окремою системою збудження для контролю напруги та регулятором швидкості для регулювання частоти. Принцип полягає в тому, щоб підтримувати частоту і напругу постійним шляхом регулювання параметрів регулятора струму, рівних практичним константам машини. Структурну схему дизельного генератора з фазним ротором із зовнішнім керуванням збудження наведено на рисунку 1.1 [3].

Конденсатор і навантаження підключені до сторони статора, а сторона ротора – до інвертора. Призначення конденсатора з боку статора полягає у згладжуванні пульсацій вихідної напруги, що надходять від інверторів.

Ще однією перевагою використання конденсатора з боку статора є нейтралізація струму інвертора, а також він забезпечує намагнічуючий струм для асинхронної машини. Крім того, амплітуда напруги системи змінюється за рахунок управління конденсатором з боку статора.

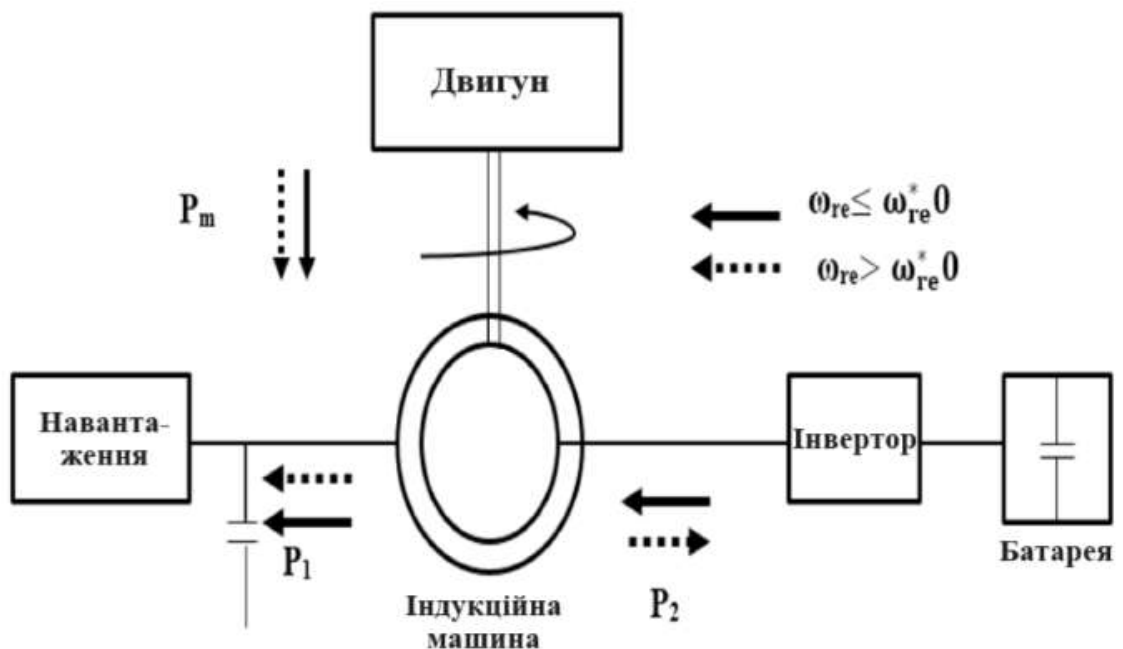


Рисунок 1.1 – Структурна схема дизельного генератора з фазним ротором із зовнішнім керуванням збудження

Керований інвертор стабілізує напругу, а частота обертання ротора змінюється залежно від навантаження. Частотне регулювання досягається за рахунок регулювання кута нахилу електричного ротора (θ_r) [4]. Інвертор і акумулятор також служать для запуску двигуна, а акумулятор заряджається і розряджається в залежності від потоку потужності. Поки двигун використовує акумулятор для запуску, важливо контролювати стан заряду акумулятора під час роботи системи, щоб уникнути подальшого збою запуску [3].

1.1.2 Синхронний генератор з постійними магнітами та суперконденсатором

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 [5].

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 [6–8].

У схемі використовуються два окремі двонаправлені перетворювачі постійного струму для суперконденсатора та акумуляторної батареї. Перевага такої конструкції полягає у незалежному управлінні СК та акумулятором виходячи з меж динамічного реагування. Причиною одночасного використання СК з акумулятором є обмеження СЗ акумулятора та часу його розрядження. На

рисунку 1.2 зображений типовий ДГЗШ, керований СК і силовими перетворювачами.

Інший спосіб відображення впливу миттєвого зміни навантаження на працездатність ДГ представлений [9], де підвищуюче-знижувальні двонаправлені перетворювачі ПС служать буфером енергії для СК. У цій конструкції перетворювачі використовують перетворення змінного/постійного/змінного струму для забезпечення постійної частоти та напруги. До перетворювача постійного струму підключено енергетичні буфери. Що стосується першого підключення, то буферна система підключається безпосередньо до випрямляча для спрощення системи за допомогою простого перетворювача, що регулює. При другому підключенні буфер та інвертор підключаються за допомогою трансформаторів. Роль трансформаторів полягає у окремому задоволенні нестабільності попиту шляхом ізоляції вхідних параметрів від вихідних.

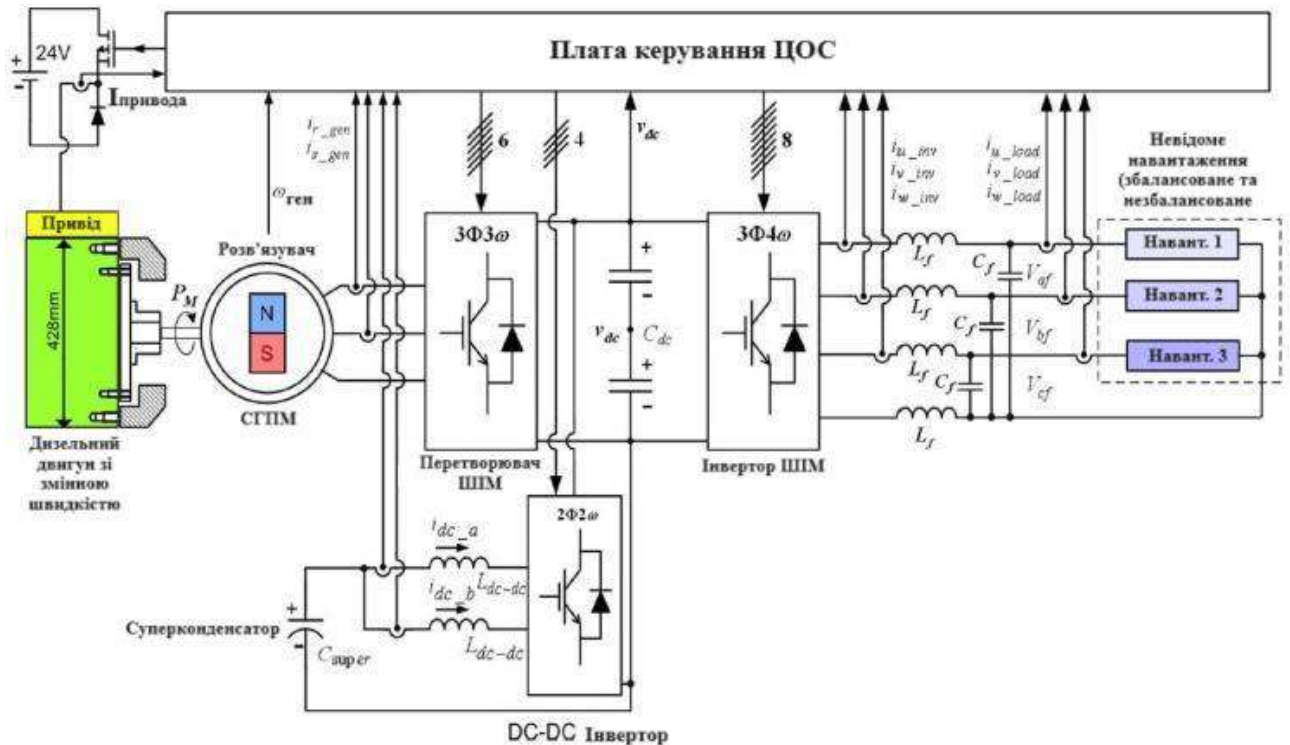


Рисунок 1.2 – Структурна схема синхронного генератора з постійними магнітами та суперконденсатором [6]

1.2 Основні схеми та характеристики бензинового генератора

Генератор електроенергії, що працює на бензині, є дуже зручною конструкцією. Цей пристрій перетворює енергію від обертового валу в електричний імпульс.

Бензинові генератори можуть використовуватися і як постійне, і як резервне джерело електроенергії. Наприклад, пристрій може запускатися при раптовому відключенні електроенергії в мережі (обриві проводів), коли необхідно використовувати інструменти, на будівництві, на дачній ділянці.

Всі бензинові генератори, незалежно від типу і моделі, мають загальний принцип конструкції [10]:

- 1 – безпосередньо сам генератор. Електричний пристрій, який механічну енергію перетворює в електричний імпульс;
- 2 – двигун, який працює на бензині;
- 3 – паливний бак різного об'єму;
- 4 – раму, що фіксує корпус агрегату.

Всі моделі оснащені блоком управління, індикаторною панеллю з регуляторами включення і виключення бензинового генератора (див. рис. 1.3, рис. 1.4).

Типи генераторів за моделлю двигуна. Двигун генератора – це основна деталь всієї конструкції, яка визначає якість перетворення механічної енергії в електричні імпульси.

Сьогодні використовують двотактні і чотиритактні двигуни, що визначають потужність бензинового генератора [10]:

1) Особливою популярністю серед випадкових користувачів користуються двотактні моделі. Такі пристрої досить легко запускаються, мають компактні розміри і невелику вагу. До переваг також слід віднести економію бензину. Генератор такого типу може працювати навіть під час зимових холодів, а крім того, він не особливо вибагливий у догляді.

пристрої зазвичай використовуються для забезпечення енергією (в разі аварійної ситуації) станцій технічного обслуговування автомобілів, для будівельних компаній і груп, що займаються ремонтними роботами.

Крім моделі двигуна, може відрізнятися матеріал, який використовується для виготовлення циліндрів. Найчастіше використовуються алюмінієві або чавунні циліндри.

Використання алюмінію дозволяє виробникам випускати компактні і високомобільні конструкції. Однак власники завжди повинні спостерігати за перебоями в роботі генератора. Блоки з чавуну мають велику вагу, але в той же час високу потужність.

1.3 Висновки за розділом

Було розглянуто деякі схеми та принцип дії дизельних генераторів з фазним ротором АГФР та з суперконденсатором ДГСК, типові бензинові генератори.

Серед різних методів керування вихідною напругою ДГЗШ, на яку впливає зміна частоти обертання ротора, найбільш часто використовують генератори з фазним ротором (АГФР). Цей тип генераторів збирається з окремою системою збудження для контролю напруги та регулятором швидкості для регулювання частоти.

Метою використання дизель-генератора на основі суперконденсатора (ДГСК) в енергосистемі є компенсація суттєвої або раптової зміни навантаження або захист мережі у разі нестачі електроенергії. Однією з суттєвих переваг є мінімізація впливу коливань навантаження на дизельний двигун.

Найбільш поширені у продажу двотактні і чотиритактні двигуни, що визначають потужність бензинового генератора.

Крім моделі двигуна, може відрізнятись матеріал, який використовується для виготовлення циліндрів. Найчастіше використовуються алюмінієві або чавунні циліндри.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Проблеми роботи дизельних генераторів на постійній швидкості

Звичайні 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 [12,13].

У типовій енергосистемі, щоб уникнути будь-якого зниження навантаження, параметри 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 [14].

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 [14].

Для звичайних ДГПШ це погіршує якість виробленої вихідної потужності, тому що колінчастий вал дизельного двигуна обертається

синхронно з ротором електрогенератора.

Рисунок 2.1 ілюструє підвищення ефективності використання ДГЗШ в порівнянні з двигуном із фіксованою швидкістю, особливо при низьких навантаженнях [14].

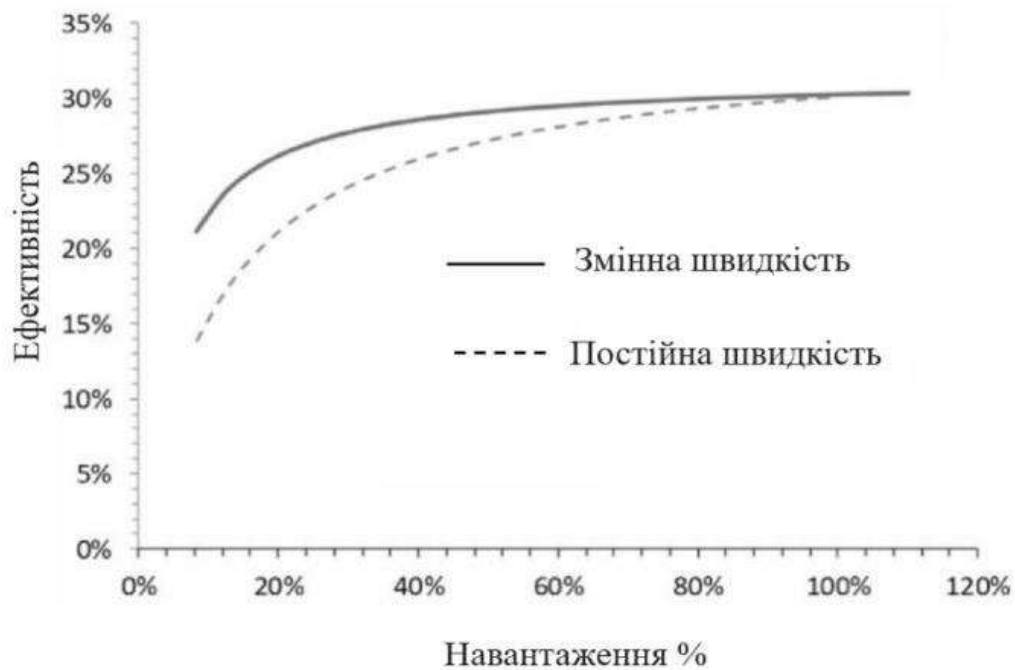


Рисунок 2.1 – Порівняльна характеристика ефективності ДГЗШ та ДГПШ

2.2 Переваги роботи дизельних генераторів зі змінною швидкістю

Дизель-генератори з фіксованою швидкістю призначені для зміни діапазону швидкостей дизельного двигуна в обмеженому діапазоні, та їх ККД різко падає при роботі з низьким електричним навантаженням [14,15].

Висока витрата палива на кВт·год є наслідком роботи дизельного двигуна на постійній швидкості при частковому або низькому режимі навантаження. Крім того, підвищується вартість обслуговування під час роботи з низьким навантаженням через коксування циліндра чи, у разі, заклинювання поршня [15].

ДГЗШ – це рішення для оптимізації витрати двигуна та підвищення ефективності системи в різних режимах. Це покращує роботу системи, адаптуючи швидкість дизельного двигуна до необхідного механічного навантаження від генератора. ДГЗШ підвищує ефективність, збільшує термін служби двигуна, знижує витрату палива та викиди парникових газів.

Звичайні ДГПШ з фіксованою швидкістю рідко можуть працювати при навантаженні менше 50 % від максимальної, проте як ДГЗШ можуть працювати протягом тривалого періоду при низькій швидкості обертання для підтримки низьких навантажень.

2.3 Переваги та недоліки бензинових генераторів

Бензинові генератори використовуються в різних сферах, а тому вважаються досить популярним пристроєм зі своїми перевагами і недоліками.

Генератори, що працюють на бензині, мають ряд переваг перед іншими моделями [10]:

- компактність і портативність. Навіть самі громіздкі конструкції можна перенести в іншу зону;
- висока потужність;
- універсальність застосування (на дачній ділянці, під час відпочинку на природі, на будівельному майданчику);
- всі бензинові генератори характеризуються достатньою простотою експлуатації. Для включення невеликого домашнього пристрою найчастіше використовується ручний старт. Для більш потужних конструкцій використовується стартерний двигун;
- безсумнівним плюсом є наявність системи автоматичного відключення приладу в разі перегріву;
- низький рівень шуму діючої установки;

- особливої популярності набули бензинові генератори з автозапуском;
- завдяки продуманій конструкції корпусу генератор можна використовувати на відкритих просторах, наприклад, на будівельному майданчику.

Такі бензинові генератори не вимагають особливих вимог до обслуговування. Для підтримки оптимальної продуктивності досить перевіряти рівень масла перед кожним включенням машини. Також потрібно буде періодично чистити або міняти свічки.

2.4 Висновки за розділом

Дизельні генератори що працюють з постійною швидкістю обертання при використанні як джерело електричної енергії найбільш ефективні при максимальних (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. Висока витрата палива на кВт·год є наслідком роботи дизельного двигуна на постійній швидкості при частковому або низькому режимі навантаження. Крім того, підвищується вартість обслуговування під час роботи з низьким навантаженням через коксування циліндра чи, у разі, заклинювання поршня.

Отже, щоб підвищити паливну ефективність системи, швидкість дизельного двигуна має синхронізуватися із зміною навантаження. Тому розглядаємо системи дизельних генераторів зі змінною швидкістю обертання.

ДГЗШ – це рішення для оптимізації витрати двигуна та підвищення ефективності системи в різних режимах. Це покращує роботу системи, адаптуючи швидкість дизельного двигуна до необхідного механічного

навантаження від генератора. ДГЗШ підвищує ефективність, збільшує термін служби двигуна, знижує витрату палива та викиди парникових газів.

Генератори, що працюють на бензині, мають ряд переваг перед іншими моделями:

- компактність;
- висока потужність;
- простота експлуатації
- низький рівень шуму.

3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ ПОСТІЙНІЙ ТА ЗМІННІЙ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ

3.1 Методи дослідження дизельних генераторів

Для керування ДГ та отримання 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.

3.1.1 Електричний метод 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 [6].

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 [6].

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 (рис. 3.1) [6].

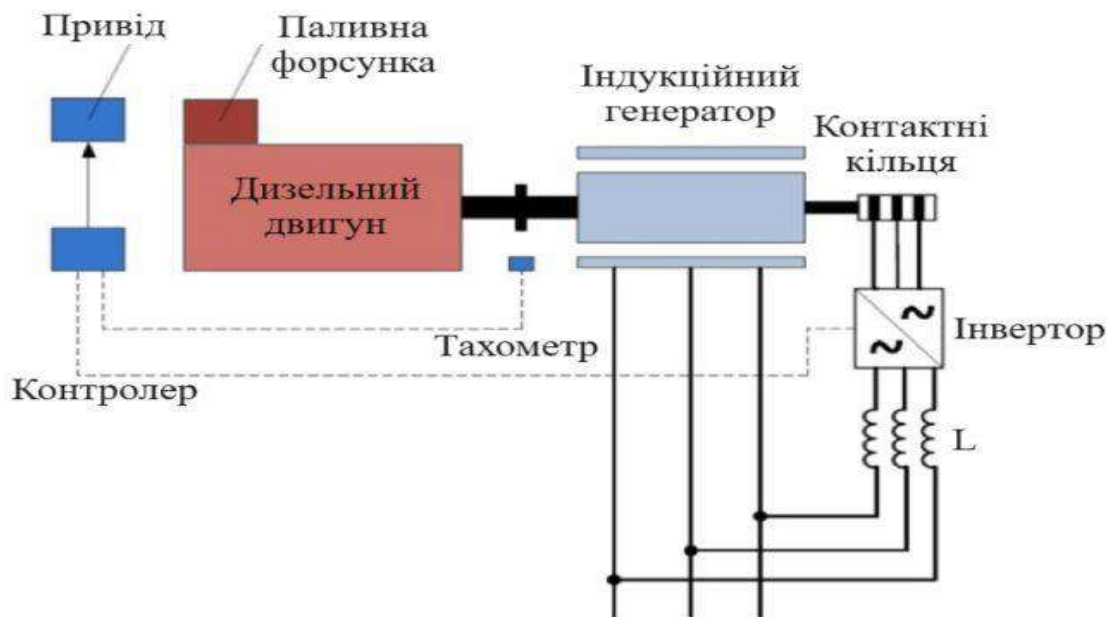


Рисунок 3.1 – Дизельний двигун зі змінною частотою обертання та індукційним генератором з подвійним живленням

У цій топології зміна швидкості дизельного двигуна залежить від потужності зустрічно-зворотного 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 % [15]. 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.

3.1.2 Механічний метод 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 [16].

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.

3.1.3 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 3.2 ілюструє порівняння продуктивності ДГЗШ та звичайного ДГ у різних кліматичних умовах [17].

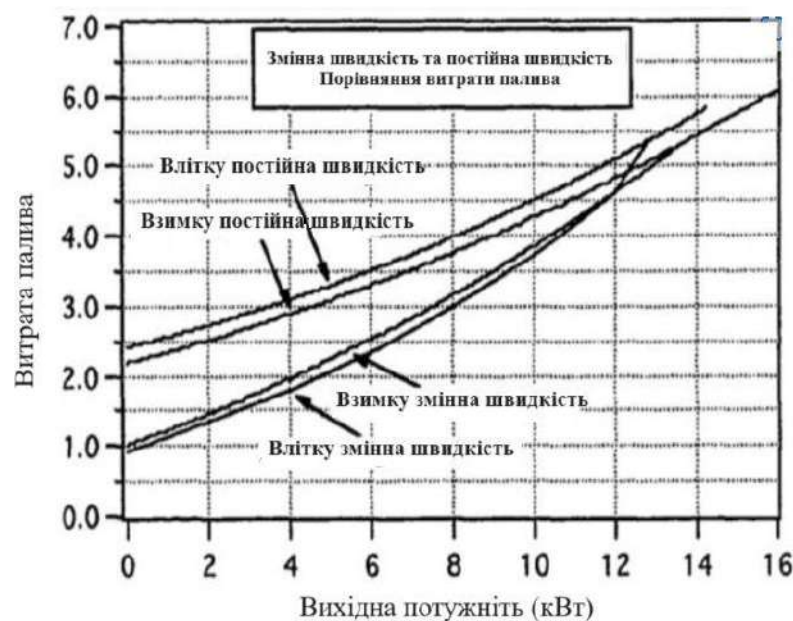


Рисунок 3.2 – Залежність вихідної потужності від витрати палива ДГЗШ та ДГПШ у різних кліматичних умовах

Економічні аспекти. Як видно з рисунку 3.2, 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 наступні переваги:

- підвищена паливна економічність (залежно від характеристики навантаження);
- збільшення ресурсу двигуна;
- збільшення часу між кожним капітальним ремонтом двигуна.

Технічні аспекти. 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 3.3 ілюструє, як адаптувати крутний момент і швидкість двигуна для оптимізації паливної економичності [18].



Рисунок 3.3 – Характеристики дизельного двигуна, що пов'язані з двохолюсним генератором

3.2 Методи дослідження бензинових генераторів

Важливою характеристикою для вибору бензинового генератора є принцип роботи. Розрізняють синхронні та асинхронні моделі, кожна з яких має різний пристрій та принцип перетворення енергії:

1) Синхронні генератори мають ротор, який обертається під дією двигуна внутрішнього згорання. При цьому магнітне поле навколо ротора обертається одночасно. Магнітне поле сприяє появі або однофазного, або

двофазного напруги в обмотці. Така конструкція генератора дозволяє з високою точністю підтримувати напругу і швидкість. Такі пристрої не бояться перевантажень в мережі, різкої зміни режиму роботи генератора. Пристрій цієї моделі здатне витримувати значні навантаження від більшості побутових приладів і різних інструментів.

2) Асинхронні генератори. У бензинових генераторах такого типу відсутній зв'язок з ротором, а тому автоматичне регулювання напруги неможливо. Всі параметри електричного струму змінюються динамічно, в залежності від навантаження на обмотку.

Асинхронний пристрій дуже чутливий до різких перепадів напруги і може піддаватися значному перегріву обмотки. Щоб не допустити цього дефекту, виробники оснастили такі генератори конденсаторами, які відключаються тільки після стабілізації струму в мережі.

Переваги інверторного генератора Всі розглянуті моделі перетворювачів енергії відносяться до класичних конструкцій. Інверторні бензинові генератори мають схожу будову, але відрізняються принципом роботи:

Вихідна напруга генератора не відразу спрямовується на споживача.

Вихідна напруга піддається впливу на випрямляч, а потім перетворюється в постійну величину.

На наступному етапі напруга піддається впливу конденсатора і тільки потім надходить в інвертор для перетворення в змінну напругу.

Така конструкція і особливості експлуатації мають ряд очевидних переваг перед традиційними моделями:

1) Вихідна напруга не має різних амплітуд і частот імпульсів.

2) При виникненні навіть невеликих коливань амплітуди або частоти відразу спрацьовує вихідний ключ.

3) Така конструкція генератора сприяє економічній експлуатації пристрою.

4) Всі інвертори відрізняються компактними розмірами і невеликою вагою.

5) Надійність пристрою як для споживача, так і для всієї мережі в цілому.

Інверторний генератор став особливо популярним завдяки максимальній точності регулювання параметрів вихідної напруги.

3.3 Порівняння методів роботи дизельних генераторів зі змінною швидкістю

Для порівняння різних методів, що розглянуто в розділі 3.1, вибираються на основі описаних у літературі прикладів чотири різні групи застосування електроенергії, у яких теоретичні вимоги зазвичай стикаються з практичними проблемами (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – 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 3.4 вказане порівняння ДГЗШ для чотирьох груп застосування електроенергії [12].

З гістограми (рис.3.4), ДГСК продемонстрував швидку реакцію в разі раптової різкої зміни навантаження. Суперконденсатор, з'єднаний з акумуляторною системою зберігання, компенсує необхідну потужність для споживачів.

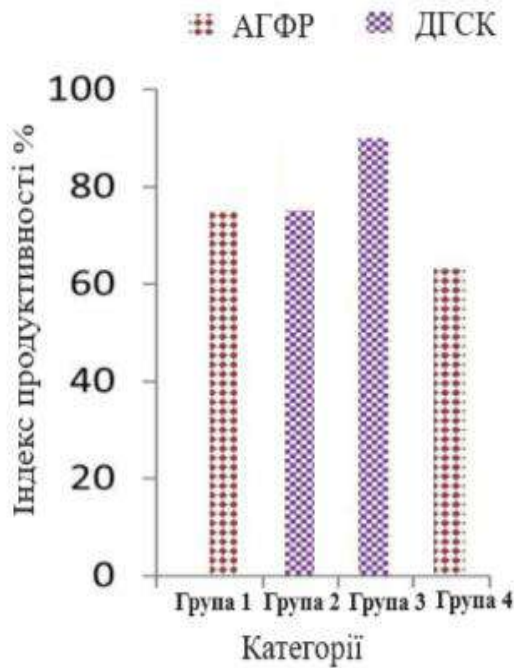


Рисунок 3.4 – Порівняння продуктивності трьох методів керування ДГЗШ

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.

3.3.1 Порівняння продуктивності дизельних генераторів зі змінною швидкістю в енергосистемі

У таблиці 3.2 запропоновано три важливі фактори, на які може вплинути використання типового ДГЗШ в енергосистемі. Увагу приділимо коефіцієнту якості електроенергії. Для розуміння електромагнітних явищ і регулювання результатів вимірювань важливо класифікувати порушення якості електроенергії [19].

Таблиця 3.2 – 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 [20,21,22,23].

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.[24]

3.3.2 Порівняння економії палива

Основною причиною 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 3.5 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 3.5 є кращою областю, де двигун працює ефективно [25].

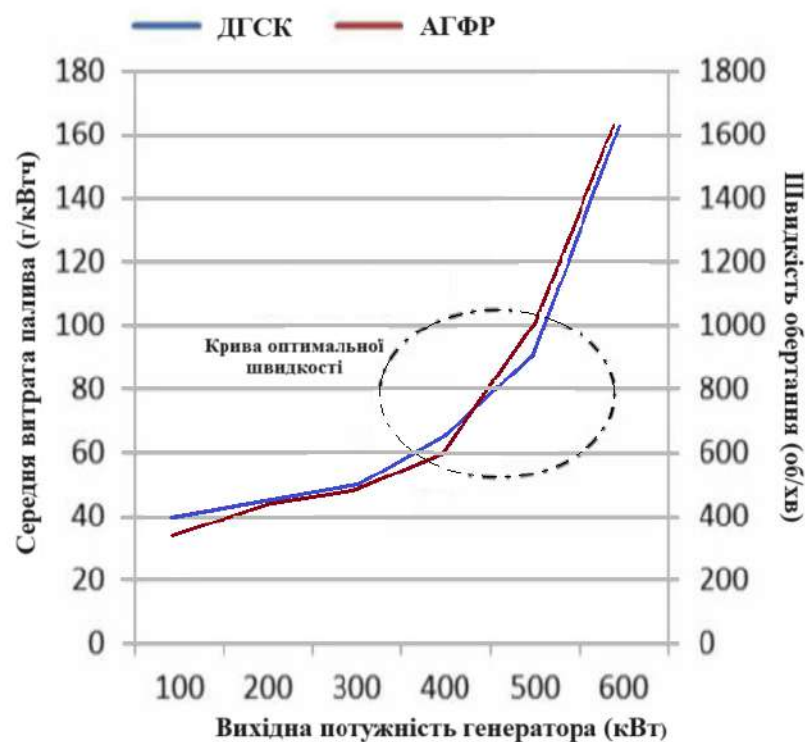


Рисунок 3.5 – Порівняння споживання палива ДГЗШ

3.4 Висновки за розділом

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.

4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДВИГУНА ВАЗ-2101 НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

4.1 Підготовка даних для теплового розрахунку в програмі Engine Calculation

В розділі наведено розрахунок робочого циклу двигуна ВАЗ-2101, виконаний за методикою [28].

Виконуємо оцінку очікуваної величини середнього ефективного тиску p_e залежно від тиску наддуву p_k , температури наддувочного повітря T_k і типу двигуна. Далі на основі формули ефективної потужності

$$N_e = i \cdot V_h \cdot p_e \cdot \frac{n}{\tau} \quad (4.1)$$

розраховуємо робочий об'єм даного циліндра.

Згідно індивідуального завдання $N_e = 45,6$ кВт при $n = 5600$ хв⁻¹.

$$V_h = \frac{N_e}{i \cdot p_e} \cdot \frac{\tau}{n} = \frac{45.6 \cdot 10^3}{4 \cdot 0.81 \cdot 10^6} \cdot \frac{2 \cdot 60}{5600} = 0,0003016 \text{ м}^3. \quad (4.2)$$

Діаметр циліндра:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot \frac{S}{D}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,0003016}{3,14 \cdot 0,87}} = 0,0762 \text{ м}. \quad (4.3)$$

Згідно даних двигуна-прототипа уточнюємо $D = 76$ мм.

Хід поршня:

$$S = D \cdot S/D = 0,076 \cdot 0,87 = 0,0661 \text{ м}. \quad (4.4)$$

Згідно даних двигуна-прототипа уточнюємо $S = 66$ мм.

Радіус кривошипа:

$$r_k = \frac{S}{2} = \frac{0,066}{2} = 0,033 \text{ м.} \quad (4.5)$$

Уточнюємо робочий об'єм циліндра:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S = \frac{3,14 \cdot 0,076^2}{4} \cdot 0,066 = 0,000299 \text{ м}^3. \quad (4.6)$$

На другому етапі розраховуємо усі величини, які являються початковими при використанні ФММ, заносимо їх до таблиці 4.1.

Тип двигуна – бензиновий.

1. Теплота згорання палива $H_{uT} = 44$ МДж/кг.
2. Показник процесу згорання вибирають на основі рекомендацій за емпіричними даними. Для бензинових ДВЗ $m_1 = 3,2...4,0$. Приймаємо $m_1 = 3,5$.
3. Кількість циліндрів: 4.
4. Рядний.
5. Діаметр циліндра $D = 0.076$ м.
6. Площа поршня є площею плоскої поверхні поршня, перпендикулярної осі циліндра, вона дорівнює:

$$F_{\Pi} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,076^2}{4} = 4,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.7)$$

7. Радіус кривошипа $r_k = 0,033$ м.

8. Відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна $\lambda_k = \frac{r_k}{L_{ш}}$ є

конструктивним параметром, що характеризує геометрію кривошипно-

шатунового механізму. У двигуна-прототипа довжина шатуна $L_{ш} = 0,135$, тоді:

$$\lambda_k = \frac{r_k}{L_{ш}} = \frac{0,033}{0,135} = 0,245. \quad (4.8)$$

9. Площа теплообміну поршня $F_{п}'$ залежить від конфігурації днища. При плоскому днищі $F_{п}' = F_{п}$. Якщо днище має складну конфігурацію, наприклад при виконанні спеціальних проточок на поршні для клапанів, то $F_{п}' > F_{п}$. Для бензинових ДВЗ $F_{п}' = (1,0 \dots 1,1) \cdot F_{п}$;

За прототипом приймаємо:

$$F_{п}' = 1,05 \cdot F_{п} = 1,04 \cdot 0,00453 = 4,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.9)$$

10. Площа теплообміну кришки F_k залежить від конструкції камери стиснення. У бензинових ДВЗ застосовують плоскі, шатрові, клиновидні, овальні, напівсферичні та інші камери; для них має місце співвідношення $F_k = (1,1 \dots 1,3) \cdot F_{п}$;

$$F_k = 1,22 \cdot F_{п} = 1,2 \cdot 0,00453 = 5,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (4.10)$$

11. Об'єм камери стиснення розраховують за співвідношенням:

$$V_c = \frac{\pi}{2} D^2 \cdot r_k \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} = \frac{3,14}{2} 0,076^2 \cdot 0,033 \cdot \frac{1}{8,5 - 1} = 39,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (4.11)$$

12. Двигун не має агрегатів наддуву, тому тиск на впуску $p_k = p_o = 101000$ Па.

13. Температура повітря на вході в двигун $T_k = T_o = 293$ К.

14. Кут початку згорання φ_c залежить від кута випередження

запалювання $\Delta\varphi_{оп}$ у бензинових ДВЗ:

$$\varphi_c = 360 - \Delta\varphi_{оп} = 360 - 30 = 330^\circ \text{ п.к.в.}, \quad (4.12)$$

де $\Delta\varphi_{оп} = 18 \dots 35^\circ$ – величина, яка залежить від швидкохідності двигуна, розмірів і типу камери згорання.

15. Кут кінця згорання пов'язаний з кутовою тривалістю згорання $\Delta\varphi_{сг}$, яка визначається в залежності від типу двигуна:

$$\varphi_z = \varphi_c + \Delta\varphi_{сг} = 330 + 55 = 385^\circ \text{ п.к.в.} \quad (4.13)$$

16. Кутова швидкість обертання кривошипа ω , рад/с, визначається в залежності від частоти обертання колінчатого валу n , с^{-1} :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5600}{60} = 586,1 \text{ с}^{-1}. \quad (4.14)$$

17. Коефіцієнт надлишку повітря α на номінальному режимі: $\alpha = 0,79$.

18. Циклова подача палива знаходиться в залежності від циклового заряду повітря.

Цикловий масовий заряд повітря в циліндрі

$$\Delta m_{вц} = V_h \cdot \rho_k \cdot \eta_v = 0,000299 \cdot 1,201 \cdot 0,689 = 247,51 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл}, \quad (4.15)$$

де щільність заряду на вході в циліндр визначається за формулою

$$\rho_k = \frac{p_k}{RT_k} = \frac{101000}{287 \cdot 293} = 1,201 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (4.16)$$

коефіцієнт наповнення дорівнює

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \cdot \frac{p_k - \Delta p_{\text{вп}}}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \gamma T_\Gamma}, \quad (4.17)$$

$$\eta_v = \frac{8,5}{8,5-1} \cdot \frac{101000-10100}{101000} \cdot \frac{293}{293+6+0,15 \cdot 900} = 0,689$$

де $\Delta p_{\text{вп}} = (0,05 \dots 0,15) \cdot p_k = 0,1 \cdot 101000 = 10100$ Па – втрата тиску на впуску;

$\Delta T = 0 \dots 20$ К – підігрів заряду на впуску для бензинових ДВЗ,

$\gamma = 0 \dots 0,2$ – коефіцієнт залишкових газів.

$T_\Gamma = 900 \dots 1100$ К – температура залишкових газів для бензинових двигунів.

Циклова масова подача палива:

$$\Delta m_{\text{тц}} = \frac{\Delta m_{\text{вц}}}{\alpha \cdot \ell_o} = \frac{0,00024751}{0,79 \cdot 14,96} = 20,94 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл.} \quad (4.18)$$

19. Середня температура стінок T_w залежить від типу двигуна, рівня форсування, режиму роботи, матеріалів основних деталей (поршня, кришки, клапанів, циліндра). З рекомендацій [28] приймаємо $T_w = 550$ К.

20. Початковий тиск дорівнює:

$$p_a = p_k - \Delta p_{\text{вп}} = 101000 - 10100 = 90900 \text{ Па,} \quad (4.19)$$

21. Початкова температура оцінюється за допомогою формули, отриманої на основі балансу енергії при впуску:

$$T_a = \frac{1}{1+\gamma} (T_k + \Delta T_{\text{вп}} + \gamma T_\Gamma), \quad (4.20)$$

$$T_a = \frac{1}{1+0,15} (293 + 6 + 0,15 \cdot 900) = 377,4 \text{ К.}$$

22. Початкова маса робочого тіла в циліндрі дорівнює сумі масових кількостей свіжого заряду і залишкових газів, отже:

$$m_a = (1 + \gamma) \cdot \Delta m_{\text{вц}} = (1 + 0,15) \cdot 0,00024751 = 284,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл.} \quad (4.21)$$

23. Початковий об'єм циліндра:

$$V_a = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} V_h = \frac{8,5}{8,5 - 1} 0,000299 = 339,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (4.22)$$

Початкові параметри повинні задовольняти рівнянню стану, яке в даному випадку є контрольним:

$$\begin{aligned} P_a V_a &= R m_a T_a, & (4.23) \\ 90900 \cdot 0,0003392 &= 287 \cdot 0,0002846 \cdot 377,4, \\ 30,833 &= 30,826. \end{aligned}$$

Похибка цього рівняння складає 0,02 %.

24. Для виконання динамічного розрахунку необхідно знати маси частин, що поступально рухаються і обертаються. Приведена маса частин, що поступально рухаються, включає масу поршневого комплекту (поршня, пальця, кілець) і частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця:

$$\begin{aligned} m_A &= [m_{\text{п}}' + (0,2 \dots 0,3) \cdot m_{\text{ш}}'] \cdot F_{\text{п}}, & (4.24) \\ m_A &= [110 + 0,25 \cdot 150] \cdot 0,00453 = 0,669 \text{ кг,} \end{aligned}$$

де коефіцієнт 0,25 представляє частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця.

Величини $m_{\text{п}}'$ і $m_{\text{ш}}'$ в правій частині формули визначають на основі статистичних даних існуючих конструкцій ДВЗ та двигуна-прототипа.

X. Розрахунковий крок рівний $\Delta\varphi = 1^\circ$.

Інформацію за пунктами I-X заносимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові дані для розрахунку робочого циклу двигуна ВА3-2101 до програми Engine Calculation

№	Найменування величини	Значення величин	Позначення і одиниці виміру
I.	Код двигуна	0	У
II.	Вид розрахунку	1	–
III.	Тип двигуна 1. Теплота згорання палива 2. Показник процесу згорання	44000000 3,5	$H_{ут}$, Дж/кг m_1
IV.	Конструктивні дані 3. Кількість циліндрів 4. Рядний (1); V-подібний (0) 5. Діаметр циліндра 6. Площа поршня 7. Радіус кривошипа 8. Відношення $\lambda_k = \frac{r_k}{L_{ш}}$ 9. Площа теплообміну поршня 10. Площа теплообміну кришки 11. Об'єм камери стиснення	4 1 0.076 0.00453 0.033 0.245 0.00472 0.00553 0.0000399	i – D , м $F_{п}$, м ² r_k , м λ_k $F_{п}'$, м ² F_k , м ² V_c , м ³
V.	Наддув 12. Тиск наддуву 13. Температура повітря	101000 293	p_k , Па T_k , К
VI.	Регульовальні дані 14. Кут початку згорання 15. Кут кінця згорання	330 385	φ_c , град. φ_z , град.
VII.	Режимні дані 16. Кутова швидкість валу 17. Коефіцієнт надлишку повітря 18. Циклова подача палива 19. Середня температура стінок	586,1 0,79 0,02094 550	ω , рад/с α $\Delta m_{тп}$, г/цикл T_w , К
VIII.	Початкові умови 20. Тиск 21. Температура 22. Маса робочого тіла 23. Об'єм робочої порожнини	90900 377,4 0,0002846 0,0003392	p_a , Па T_a , К m_a , кг/цикл V_a , м ³
IX.	Дані до динамічного розрахунку 24. Маса поступально рухомих частин (приведена)	0,669	m_A , кг
X.	Розрахунковий крок	1	$\Delta\varphi$, град.

Студент гр. Т-412м

Грачов П.В.

Керівник ст. викладач

Рябошапка Н.Є.

4.2 Контроль та аналіз результатів теплового розрахунку

За результатами розрахунку отримано протокол теплового розрахунку (додаток Б), основні циклові і питомі показники двигуна ВАЗ-2101:

- індикаторна робота $L_i = 302,63$ Дж/цикл;
- середній індикаторний тиск $p_i = 1,0122$ МПа;
- індикаторний ККД $\eta_i = 0,466$;
- питома індикаторна витрата палива $g_i = 0,2491$ кг/(кВт·год).

Контрольною величиною для оцінки результатів розрахунку є ефективна потужність двигуна, яка розраховується за формулою:

$$N_e = i \cdot L_i \cdot \frac{n}{\tau} \cdot \eta_m = 4 \cdot 302,63 \cdot \frac{5600}{1,60} \cdot 0,8 = 45,19 \text{ кВт} \quad (4.25)$$

де η_m – механічний ККД двигуна, який враховує вплив механічних втрат.

Розрахуємо інші ефективні показники двигуна:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m = 1,0122 \cdot 0,8 = 0,810 \text{ МПа}; \quad (4.26)$$

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = 0,466 \cdot 0,8 = 0,373; \quad (4.27)$$

$$g_e = g_i / \eta_m = 0,2491 / 0,8 = 0,3114 \text{ кг/(кВт·год)}. \quad (4.28)$$

При порівнянні з початковими даними та паспортними даними двигуна ВАЗ-2101, розрахована похибки:

- для ефективної потужності 0,9 %;
- для середнього ефективного тиску 0 %;
- для питомої ефективної витрати палива 2,7 %.

Основними параметрами, які характеризують механічну і термічну напруженість деталей двигуна, є тиск і температура робочого тіла. У протоколі теплового розрахунку знаходимо величини максимального тиску $p_{\max} = 5,660$ МПа (при $\varphi = 371^\circ$ ПКВ) і максимальної температури

$T_{\max} = 3015,4 \text{ K}$ (при $\varphi = 376^\circ \text{ ПКВ}$).

На рисунку 4.1 показана індикаторна діаграма двигуна ВАЗ-2101.

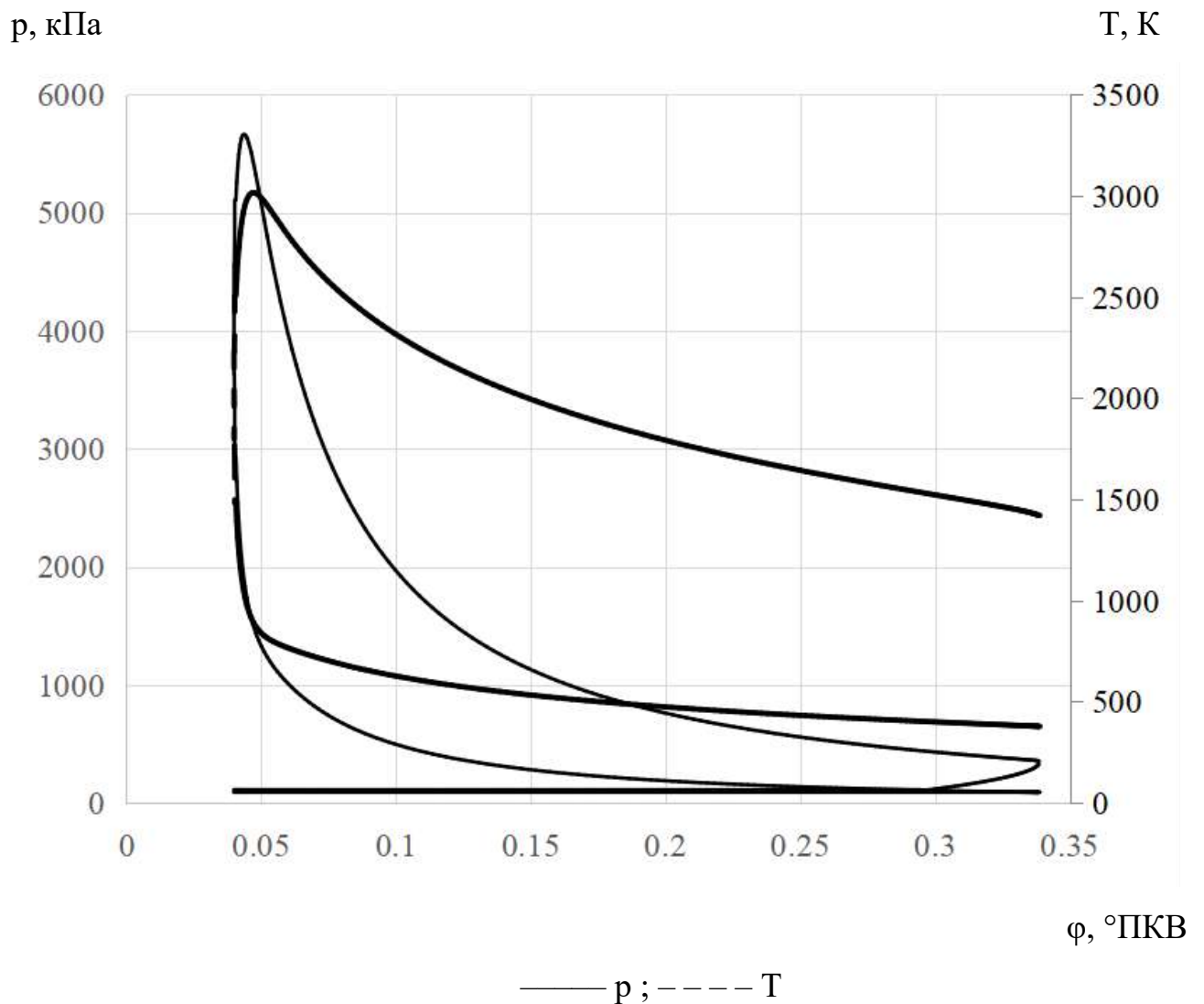


Рисунок 4.1 – Індикаторна діаграма $P(V)$ двигуна ВАЗ-2101 на номінальному режимі

4.3 Висновки за розділом

Отримана максимальна похибка розрахунку 2,7 % дозволяє стверджувати, що розрахунок термодинамічного циклу двигуна ВАЗ-2101 на номінальному режимі роботи виконаний вірно.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВАНТАЖЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ ДВЗ

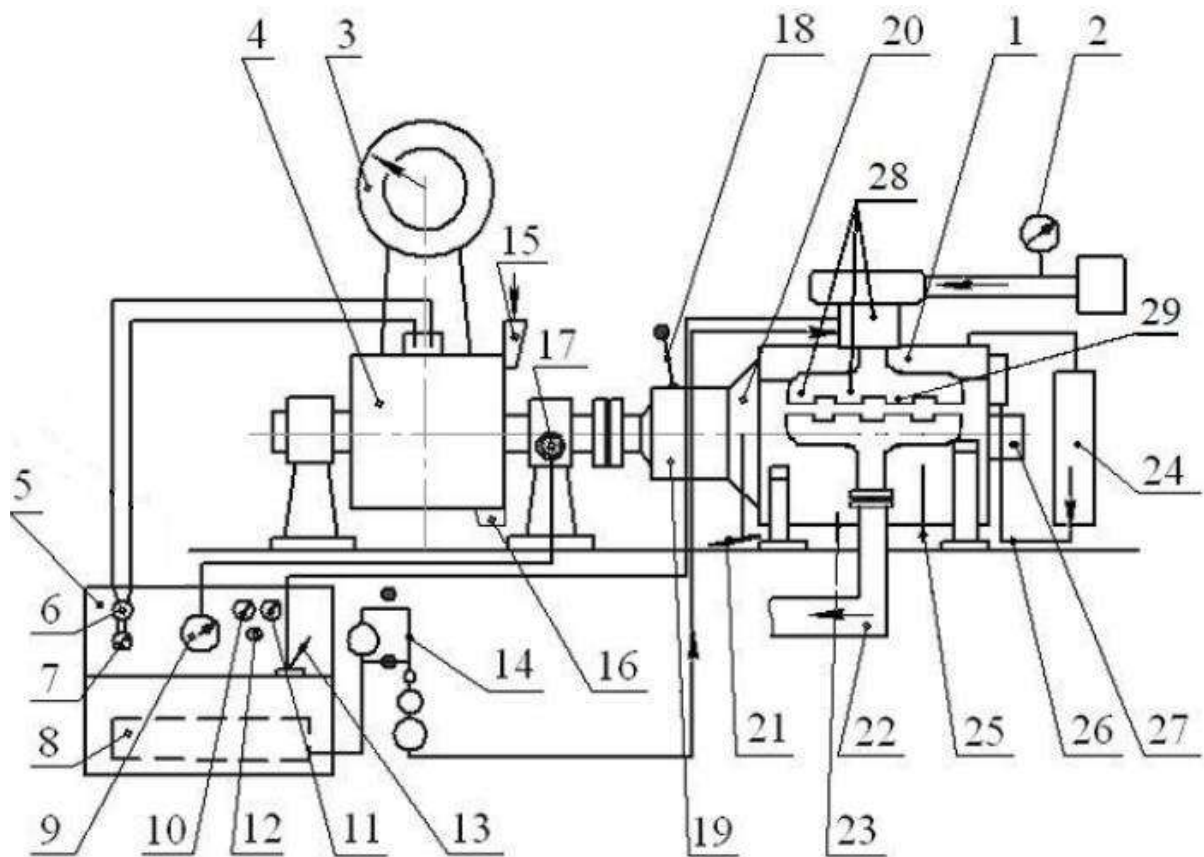
5.1 Опис випробувального стенду ДВЗ та стенду навантаження

Для навантаження ДВЗ з метою отримання його характеристик потрібно створювати навантаження на двигун, яке регулюється в широких межах.

Проведення експериментальних досліджень роботи ДВЗ проводилося на території кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» НУ «Запорізька політехніка». В навчальній лабораторії (аудиторія 141) встановлено навантажувальний стенд, на якому проводяться експерименти (рис. 5.1, 5.2).



Рис.5.1



1 – двигун; 2 – пристрій для вимірювання температури і тиску впускного колектора двигуна; 3 – вимірювальний пристрій, який реєструє силу, яку розвиває на відповідному плечі гальмівний пристрій; 4 – гальмівний пристрій, який створює навантаження на двигун та забирає потужність, яку розвиває двигун; 5 – пульт керування стендом; 6 – пульт керування навантаженням; 7 – амперметр, який реєструє струм в котушці збудження гальмівного пристрою; 8 – паливний бак; 9 – тахометр, який потрібний для вимірювання частоти обертання колінчастого вала двигуна n , хв-1; 10 – пристрій, який реєструє температуру масла в картері двигуна t_m , °C; 11 – пристрій, який реєструє тиск в системі змащення двигуна p_m , кгс/см²; 12 – замок запалювання; 13 – ручка керування положенням дросельної заслінки двигуна; 14 – сосуди для вимірювання об'єму палива, який витрачається двигуном (штіхпробер); 15 – подача охолоджуючої води в гальмівний пристрій; 16 – злив охолоджуючої води з гальмівного пристрою; 17 – датчик тахометра; 18 – ричаг ввімкнення коробки переміни передач; 19 – коробка зміни передач; 20 – муфта зчеплення; 21 – педаль включення муфти зчеплення; 22 – колектор відпрацьованих газів (ВГ); 23 – датчик тиску масла в системі змазки двигуна p_m , кгс/см²; 24 – датчик температури води системи охолодження двигуна; 25 – радіатор системи охолодження двигуна; 28 – датчики тиску; 29 – датчик температури.

Рисунок 5.2 – Схема випробувального стенда двигуна VAZ-2101 [29]

Основа стенду – залізобетонна плита, вмурована в окремий фундамент, з напрямними рейками, що необхідно для зменшення вібрацій від стенда та уникнення передачі вібрацій на будівлю. На рейках закріплено двигун ВА3-2101 зі зчепленням і коробкою переключення передач, обладнаний всіма штатними системами, і гальмівний механізм індукційного типу ІТ-22.

Особливості роботи та характеристика індуктивного гальмівного опристрою наведено в [29].

Керування навантаженням двигуна здійснюється з пульту керування навантаженням (рис. 5.3).

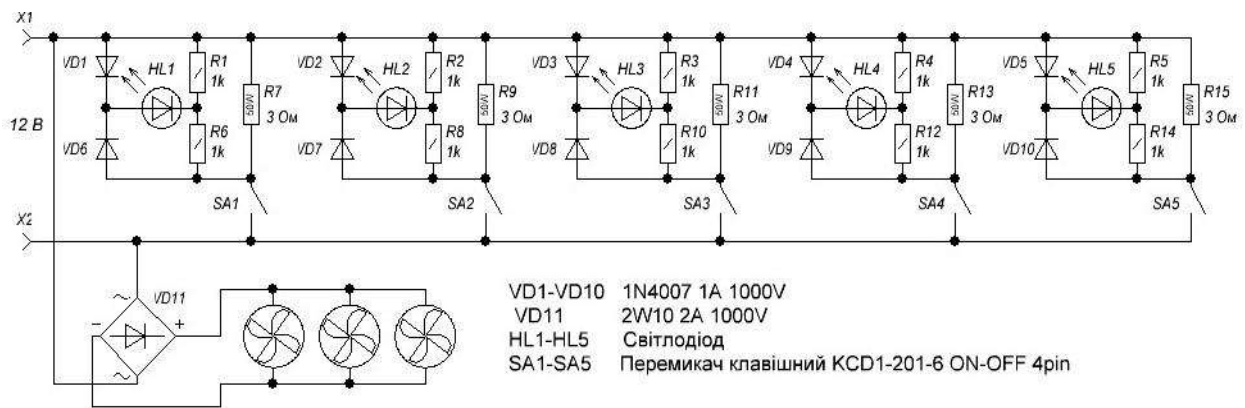


Рисунок 5.3 – Електрична схема пульту керування навантаженням

5.2 Електричні виміри роботи генератора

На навантажувальному стенді з двигуном ВА3-2101 за методикою, описаній в [29], визначаємо зовнішню характеристику двигуна. Проводимо 3 експерименти:

– № 1 – робота двигуна в режимі холостого ходу ($n = 2000 \text{ хв}^{-1}$) зі зміною величини навантаження у мережі генератора;

– № 2 – робота двигуна в номінальному режимі ($n = 2500 \text{ хв}^{-1}$) зі зміною величини навантаження у мережі генератора;

– № 3 – робота двигуна в максимальному режимі ($n = 3000 \text{ хв}^{-1}$) зі зміною величини навантаження у мережі генератора;

В ході експерименту реєструємо величини :

- частота обертання вихідного валу двигуна n , хв^{-1} ;
- сила струму гальмівного пристрою I , А;
- вихідна напруга U , В.

Результати вимірювань за експериментами № 1–3 заносимо до таблиць 5.1–5.3.

5.2.1 Вплив на робочі характеристики генератора зміни навантаження електричної системи при роботі двигуна на холостому ході

При проведенні випробувань спочатку потрібно розігнати двигун до швидкості холостого ходу ($n = 2000 \text{ хв}^{-1}$), а після досягнення заданих оборотів – почати вмикати навантаження за допомогою тумблерів SA1 - SA5 (див. рис. 5.4). При знятті характеристики визначимо струм, при якому припиняється робота регулятора напруги.

Результати вимірів заносимо в таблицю (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Дослідні дані зовнішньої характеристики випробувального стенду при роботі двигуна в режимі холостого ходу

к, кількість вимикачів	0	1	2	3	4	5
Навантаження R_n , Ом	0	3	1,5	1	0,75	0,6
Швидкість обертання, хв^{-1}	2000					
Вихідна напруга генератора U , В	14,5	14	13,3	12	10,7	10
Вихідний струм генератора I , А	0	4,7	8,9	12	14,2	16,5



Рис.5.4

5.2.2 Вплив на робочі характеристики генератора та двигуна навантаження електричної системи при роботі двигуна у номінальному режимі

При проведенні випробувань продовжуємо розганяти двигун до номінальної швидкості обертання ($n = 2500 \text{ хв}^{-1}$), а після досягнення заданих оборотів - почати вмикати навантаження за допомогою тумблерів SA1...SA5. При знятті характеристики визначимо струм, при якому припиняється робота регулятора напруги.

Результати вимірів заносимо в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Дослідні дані зовнішньої характеристики випробувального стенду при роботі двигуна в номінальному режимі

к, кількість вимикачів	0	1	2	3	4	5
Навантаження R_n , Ом	0	3	1,5	1	0,75	0,6
Швидкість обертання, xv^{-1}	2500					
Вихідна напруга генератора U, В	14,5	14,3	13,85	13,1	11,5	10,2
Вихідний струм генератора I, А	0	4,8	9,2	13,1	15,3	17

5.2.3 Вплив на роботу генератора та двигуна навантаження електричної мережі при роботі двигуна на максимальних обертах двигуна

При проведенні випробувань розганяємо двигун до максимальних обертів ($n = 3000 xv^{-1}$), а після досягнення заданих оборотів - почати вмикати навантаження за допомогою тумблерів SA1 - SA5. При знятті характеристики визначимо струм, при якому припиняється робота регулятора напруги.

Результати вимірів заносимо в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Дослідні дані зовнішньої характеристики випробувального стенду при роботі двигуна на максимальних обертах

к, кількість вимикачів	0	1	2	3	4	5
Навантаження R_n , Ом	0	3	1,5	1	0,75	0,6
Швидкість обертання, xv^{-1}	3000					
Вихідна напруга генератора U, В	14,5	14,4	14,1	13,65	12,05	10,8
Вихідний струм генератора I, А	0	4,8	9,4	13,4	16,1	18

5.3 Аналіз отриманих результатів

За даними таблиць 5.1–5.3 побудовано зовнішню характеристику генераторної установки дослідного стенду. Зовнішня характеристика генераторної установки представлена на рисунку 5.3.

Зовнішня характеристика виражає залежність випрямленої напруги генератора U від струму навантаження I при постійних частотах обертання й струмі збудження. Характеристику зняли при частоті обертання генератора n_{\max} , $n_{\text{ср}}$, n_{\min} . Зниження напруги при збільшенні навантаження генератора відбувається через спад напруги в обмотках статора, зменшення магнітного потоку в повітряному зазорі та спад напруги в ланцюзі випрямляча.

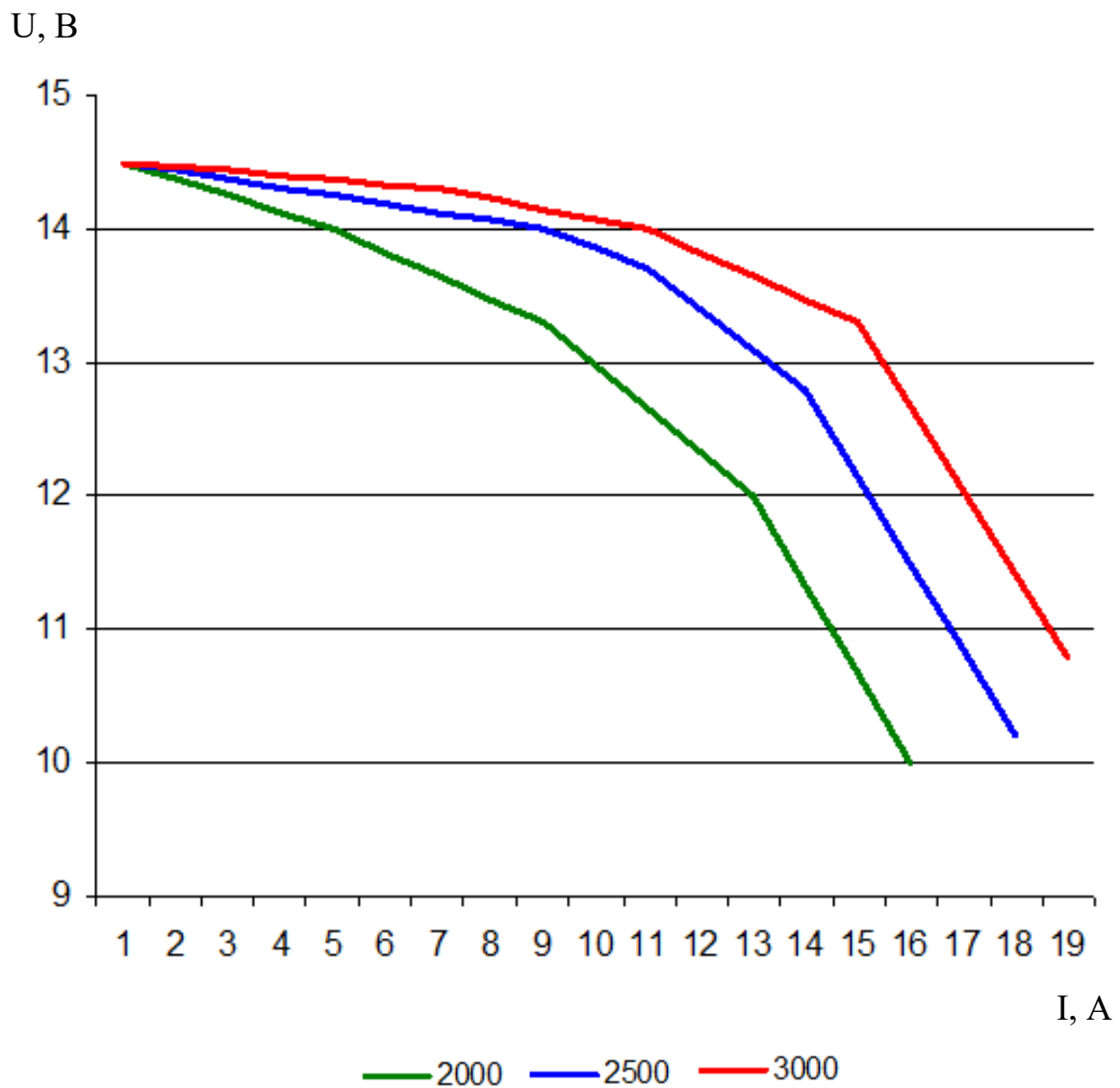


Рисунок 5.3 – Зовнішня характеристика генераторної установки дослідного стенду

ВИСНОВКИ

Детально вивчено кілька генераторів електроенергії зі змінною швидкістю з приводом від дизельного та бензинового двигуна. Оглянуто критичні критерії та практичні параметри цих прикладів.

Розробка кожної системи керування досягається на основі різних завдань, таких як регулювання напруги та частоти, мінімізація гармонік, оптимальна частота обертання двигуна, зниження викидів парникових газів тощо.

Результатом реалізації запропонованих конструкцій є економія палива при різних умовах застосування. Однак більшість конструкцій мають неефективну роботу під час величезних коливань електричного навантаження.

З точки зору гібридизації, інтеграція ДГЗШ з технологіями відновлюваної енергетики в автономному застосуванні значно підвищує ефективність двигуна, покращує стабільність системи та значно оптимізує витрати на електроенергію.

Якість електроенергії в мережі, стабільність системи та ефективність виробництва є трьома основними проблемами кожної сучасної енергосистеми.

Серед запропонованих виробничих систем деякі конструкції здатні економити більше палива і виробляти більш надійні результати.

Однак ці методи підходять не для всіх застосувань, зокрема для раптових і великих коливань навантаження. З іншого боку, деякі методи демонструють надійну продуктивність під час коливань навантаження, але не надто ефективні для невеликих споживачів, оскільки вони потребують великих початкових інвестицій.

Проведене експериментальне дослідження на базі бензинового двигуна, показало що зміна навантаження в електричній системі прямо впливає на якість вихідної напруги та потребує надійного керування вихідною напругою за допомогою різних методів керування, електричним та механічним.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison - URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/2/592>
2. 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.
3. 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, pp. 1778–1784.
4. Joshi, D.; Sandhu, K.; Soni, M. Constant Voltage Constant Frequency Operation for a Self-Excited Induction Generator. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2006, *21*, 228–234.
5. 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; pp. 1–6.
6. 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*, 2130–2135.
7. 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; pp. 162–166.
8. 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; pp. 3250–3257.

9. 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; pp. 1–10.

10. Бензиновий генератор: ТОП-10 найкращих моделей бензинових генераторів для дому та дачі 2021 + поради експертів, який вибрати - URL: https://electricsexpert.ru/benzinovyj-generator/?utm_referrer=

11. Схеми ремонту бензинових генераторів: - URL: <https://remontbenzogeneratora.com.ua/services/remont-generatorov/remont-benzogeneratora/failure/remont-benzogeneratorov-skhemy/>

12. Mobarra, M.; Rezkallah, M.; Ilinca, A. Variable Speed Diesel Generators: Performance and Characteristic Comparison. *Energies* 2022, 15, 592.- URL: <https://doi.org/10.3390/en15020592>

13. Waris, T.; Nayar, C. 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; pp. 2728–2734.

14. Hamilton, J.; Negnevitsky, M.; Wang, X. The potential of variable speed diesel application in increasing renewable energy source penetration. *Energy Procedia* 2019, 160, 558–565.

15. 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; pp. 121–126.

16. 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. *Int. J. Engine Res.* 2017, 18, 991–1004.

17. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т. 2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин

[Текст] / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов. – За ред. А. П. Марченка, А. Ф. Шеховцова. – Х. : Прапор, 2004. – 288 с.

18. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей [Текст] : Учебник для вузов / С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др.; Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 456 с.

19. More, T.G.; Asabe, P.R.; Chawda, S. Power quality issues and its mitigation techniques. *J. Eng. Res. Appl.* 2014, 4, 170–177.

20. El Sebaay, A.; Ramadan, M.; Abu Adma, M.A. Studying the Effect of Non-Linear Loads Harmonics on Electric Generator Power Rating Selection. *Eur. Sci. J. ESJ* 2017, 13, 1857–7881.

21. 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, 27.

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

23. Транспортні енергетичні установки : навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 264 с.

24. 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; Volume 2, pp. 945–950.

25. Approximate Diesel Fuel Consumption Chart. Available online: https://www.generatorsource.com/Diesel_Fuel_Consumption.aspx (accessed on 19 October 2017).

26. Manwell, J.; Stein, W.; Rogers, A.; McGowan, J. An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems. *Renew.*

Energy 1992, 2, 563–571.

27. Сажко В.А. Електрообладнання автомобілів і тракторів: Підручник. - К. : Каравела, 2009 - 400с.

28. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Теорія ДВЗ» для студентів спеціальності 7(8).05050304 «Двигуни внутрішнього згорання» всіх форм навчання [Текст] / Укл.: Г.І. Слинько, Я.О. Єгоров. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 50 с.

29. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електричне обладнання двигунів внутрішнього згорання” для студентів спеціальності 133 “Галузеве машинобудування”, спеціалізації “Двигуни внутрішнього згорання” денної та заочної форм навчання / Укладачі: Г.І. Слинько, Н.Є. Рябошапка. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 46с.

30. Автомобільні двигуни [Текст] : Підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. – К. : Арістей, 2006. – 476 с.

31. Методичні вказівки до переддипломної практики, виконання та захисту кваліфікаційної роботи магістрів, що навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», освітня програма «Двигуни внутрішнього згорання» [Текст] / Укл.: Г. І. Слинько, В. І. Кубіч, Р. Ф. Сухонос. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 38 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Протокол теплового розрахунку двигуна ВА3-2101

φ, ° ПКВ	P, кПа	T, К	m, кг	V, дм ³
1	2	3	4	5
0	90,9	377,4	0,285	0,040
10	90,9	377,4	0,285	0,043
20	90,9	377,4	0,285	0,051
30	90,9	377,4	0,285	0,065
40	90,9	377,4	0,285	0,082
50	90,9	377,4	0,285	0,104
60	90,9	377,4	0,285	0,128
70	90,9	377,4	0,285	0,154
80	90,9	377,4	0,285	0,181
90	90,9	377,4	0,285	0,208
100	90,9	377,4	0,285	0,233
110	90,9	377,4	0,285	0,257
120	90,9	377,4	0,285	0,278
130	90,9	377,4	0,285	0,296
140	90,9	377,4	0,285	0,311
150	90,9	377,4	0,285	0,323
160	90,9	377,4	0,285	0,332
170	90,9	377,4	0,285	0,337
180	88,1	377,5	0,285	0,339
190	89,0	379,1	0,285	0,337
200	91,1	382,3	0,285	0,332
210	94,7	387,1	0,285	0,323
220	100,0	393,8	0,285	0,311
230	107,5	402,6	0,285	0,296
240	117,8	413,8	0,285	0,278
250	131,9	427,9	0,285	0,257
260	151,2	445,5	0,285	0,233
270	177,9	467,1	0,285	0,208
280	215,7	493,9	0,285	0,181
290	269,9	526,9	0,285	0,154
300	349,7	567,5	0,285	0,128
310	469,2	617,1	0,285	0,104
320	649,3	676,5	0,285	0,082
330	913,3	744,6	0,285	0,065
340	1281,7	826,9	0,285	0,051
350	2071,3	1112,1	0,286	0,043
360	4158,0	2039,1	0,293	0,040
370	5633,0	2867,7	0,302	0,043

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5
380	4943,8	2973,6	0,305	0,051
390	3590,5	2726,9	0,306	0,065
400	2561,7	2486,5	0,306	0,082
410	1862,8	2282,0	0,306	0,104
420	1397,8	2112,7	0,306	0,128
430	1085,6	1973,8	0,306	0,154
440	871,9	1860,0	0,306	0,181
450	722,4	1766,5	0,306	0,208
460	615,6	1689,6	0,306	0,233
470	538,1	1626,2	0,306	0,257
480	481,1	1573,9	0,306	0,278
490	439,0	1531,0	0,306	0,296
500	407,9	1495,9	0,306	0,311
510	385,4	1467,5	0,306	0,323
520	369,6	1444,9	0,306	0,332
530	359,6	1427,6	0,306	0,337
540	350,1	1416,0	0,306	0,339
550	301,4	1416,0	0,306	0,337
560	252,8	1416,0	0,306	0,332
570	204,1	1416,0	0,306	0,323
580	155,5	1416,0	0,306	0,311
590	106,8	1416,0	0,306	0,296
600	111,7	1416,0	0,306	0,278
610	111,7	1416,0	0,306	0,257
620	111,7	1416,0	0,306	0,233
630	111,7	1416,0	0,306	0,208
640	111,7	1416,0	0,306	0,181
650	111,7	1416,0	0,306	0,154
660	111,7	1416,0	0,306	0,128
670	111,7	1416,0	0,306	0,104
680	111,7	1416,0	0,306	0,082
690	111,7	1416,0	0,306	0,065
700	111,7	1416,0	0,306	0,051
710	111,7	1416,0	0,306	0,043
720	111,7	1416,0	0,306	0,040

ВАЗ-2101

Дата:03.10.2023

Li = 302,629966 Дж/цикл

pi = 1012208,061161Па

KKDi = 0,466250

gi = 0,249096 кг/(кВт*год)

ДОДАТОК Б

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАФЕДРА «ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ»

АКТ

впровадження результатів роботи

08 листопада 2023 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови зав. кафедри «ДВЗ», д.т.н., професор Георгій СЛИНЬКО,
члени комісії к.т.н., доцент кафедри «ДВЗ» Наталя ЄВССЄВА,
старший викладач кафедри «ДВЗ» Наталя РЯБОШАПКА,
старший викладач кафедри «ДВЗ» Роман СУХОНОС.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження науково-дослідної роботи НДР 02211 «Теплові та газодинамічні процеси в двигунах внутрішнього згорання та системах», виконаної у НУ «Запорізька політехніка» згідно п. 1.3 «Оцінка ефективності теплових та газодинамічних процесів в двигунах внутрішнього згорання та системах машинобудування» тематичного плану НДР 02211 на 2023-2024 н.р., та установила, що результати вказаної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» НУ «Запорізька політехніка».

Вид та об'єм впровадження порівняльні дані щодо паливної економічності в залежності від навантаження; ресурсу двигуна; зміни періодів між капітальними ремонтами двигуна впроваджені в курс дисципліни «Електричне обладнання двигунів внутрішнього згорання» підготовки бакалаврів, що навчаються за освітньою програмою «Двигуни внутрішнього згорання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Досягнуті технічні результати, їх рівень підвищення рівня підготовки фахівців освітньої програми «Двигуни внутрішнього згорання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Голова комісії

Георгій СЛИНЬКО

Члени комісії

Наталя ЄВССЄВА

Наталя РЯБОШАПКА

Роман СУХОНОС