



А. П. Кушнір¹, Б. Л. Копчак², В. М. Оксентюк², Р. В. Алешко¹, А. І. Мандюк²

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

²Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395> – А. П. Кушнір

<http://orcid.org/0000-0002-2705-8240> – Б. Л. Копчак

<https://orcid.org/0009-0005-1491-6946> – В. М. Оксентюк

<https://orcid.org/0009-0004-6396-6061> – Р. В. Алешко

<https://orcid.org/0009-0007-8069-8494> – А. І. Мандюк



andpetkushnir@gmail.com

ЗБІЛЬШЕННЯ ЧАСУ АВТОНОМНОЇ РОБОТИ ДИЗЕЛЬНОЇ ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ЗАХИСНИХ СПОРУД

Проблема. Системи протипожежного захисту (СПЗ) є складовими забезпечення пожежної безпеки будівель, зокрема захисних споруд цивільного захисту (ЗСЦЗ) та споруд подвійного призначення (СПП). Їх надійне функціонування потребує гарантованого електроживлення, відсутність якого знижує рівень безпеки об'єкта. Для забезпечення автономної роботи СПЗ в умовах аварійного або тривалого відключення електропостачання застосовують дизельні генераторні установки (ДГУ). За сучасних умов обмежених енергетичних ресурсів актуальним є підвищення ефективності ДГУ з метою зменшення витрат пального та збільшення часу автономної роботи, зокрема шляхом не лише використання двигунів із покращеними енергетичними показниками, але і генераторів.

Мета дослідження. Збільшення часу автономної роботи ДГУ для СПЗ ЗСЦЗ та СПП завдяки покращенню якості електричної енергії, що, своєю чергою, зумовлює зменшення витрат пального. Досягнення зазначеної мети передбачається шляхом використання асинхронного генератора з фазним ротором, у коло якого інтегровано інвертор та систему самозбудження, що забезпечує підвищення коефіцієнта потужності та коефіцієнта корисної дії генератора.

Методи досліджень. У ході дослідження застосовано методи аналізу та дослідження науковців, які розвивають теорію електричних машин. Для розробки моделі автономного асинхронного генератора з інвертором у фазному роторі використовувався пакет Simulink в середовищі MATLAB. Для розрахунку витрат пального дизель-генераторної установки застосовано метод енергетичного балансу з урахуванням коефіцієнтів корисної дії двигуна, електричного генератора та коефіцієнта потужності навантаження.

Основні результати. Витрати пального дизельного двигуна залежать від режиму навантаження та частоти його обертання. Нелінійне та несиметричне навантаження спричиняє несинусоїдальні струми, що призводить до коливань напруги й частоти, пульсацій електромагнітного моменту, зростання гармонічних спотворень, зниження коефіцієнта потужності генератора та додаткових електромеханічних втрат. Зазначені фактори обумовлюють додаткові електромеханічні втрати, що, своєю чергою, призводить до збільшення витрат пального. Отже, паливна економічність ДГУ визначається, зокрема, коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi$) та ККД генератора. Асинхронні генератори з фазним ротором та інверторним керуванням, на відміну від асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором, забезпечують стабілізацію напруги й частоти при змінні швидкості обертання двигуна та коливань навантаження, компенсацію реактивної потужності та самозбудження. Це підвищує $\cos\varphi$ і ККД генератора та сприяє зменшенню витрат пального.

Висновки. Модель асинхронного генератора з інвертором у колі ротора, побудована у MATLAB дає можливість детально аналізувати його електроенергетичні параметри в різних умовах експлуатації. Використання такого асинхронного генератора, порівняно з класичним асинхронним генератором із короткозамкнутим ротором забезпечує гнучке регулювання енергетичних потоків. У результаті спостерігається підвищення коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ та ККД. Це у свою чергу, зумовлює зменшення витрат пального та збільшення тривалості роботи установки. Використання асинхронного генератора з фазним ротором і підключеним інвертором дозволяє при 40% навантаженні зменшити витрати пального приблизно на 24,5%, а при 100% навантаженні – на 12,7%. Це дає змогу збільшити тривалість роботи ДГУ. Наприклад, при 100% навантаженні автоматична система пожежогасіння може працювати на 8,7 хв довше порівняно з використанням ДГУ з асинхронним генератором із короткозамкнутим ротором.

Ключові слова: системи протипожежного захисту, захисні споруди, дизель-генераторні установки, асинхронний генератор із фазним ротором, автономні джерела живлення.

A. P. Kushnir¹, B. L. Kopchak², V. M. Oksentyuk², R. V. Aleshko¹, A. I. Mandiuk²

¹*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

²*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

INCREASING THE AUTONOMOUS OPERATING TIME OF DIESEL GENERATOR SET FOR FIRE PROTECTION SYSTEMS OF PROTECTIVE STRUCTURES

Introduction. Fire protection systems (FPS) are components of fire safety in buildings, in civil defense protective structures (CDPS) and dual-purpose structures (DPS). Their reliable operation requires a guaranteed power supply, the absence of which reduces the level of safety of the facility. To ensure the autonomous operation of FPS in the event of an emergency or prolonged power outage, diesel generator sets (DGS) are used. In the current conditions of limited energy resources, it is important to increase the efficiency of DGS in order to reduce fuel consumption and increase autonomous operation time, in particular by using not only engines with improved energy performance, but also generators.

Purpose. Increasing the DGS autonomous operation time for the FPS of CDPS and DPS by improving the quality of electrical energy, which, in turn, leads to a reduction in fuel consumption. This goal is achieved by using an induction generator with a phase rotor, into which an inverter and a self-excitation system are integrated, which increases the power factor and efficiency of the generator.

Methods. During the research, methods of analysis and investigation developed by scientists working on the theory of electrical machines were applied. The Simulink package in the MATLAB environment was used to develop a model of an autonomous **induction** generator with an inverter in a phase rotor. The energy balance method was used to calculate the fuel consumption of a diesel generator set, taking into account the efficiency coefficients of the engine, electric generator and load power factor.

Results. The fuel consumption of a diesel engine depends on the load mode and its rotation frequency. Non-linear and asymmetrical loads cause non-sinusoidal currents, which lead to voltage and frequency fluctuations, electromagnetic torque pulsations, increased harmonic distortion, reduced generator power factor and additional electromechanical losses. These factors cause additional electromechanical losses. This leads to increased fuel consumption. Therefore, the fuel efficiency of a diesel generator set is determined, in particular, by the power factor ($\cos\varphi$) and the efficiency of the generator. **Induction** generators with a phase rotor and inverter control, unlike **induction** generators with a squirrel-cage rotor, provide voltage and frequency stabilisation at variable engine speeds and load fluctuations, reactive power compensation and self-excitation. This increases $\cos\varphi$ and generator efficiency and helps reduce fuel consumption.

Conclusions. The model of an induction generator with an inverter in the rotor circuit, built in MATLAB, allows for detailed analysis of its electrical parameters under various operating conditions. Compared to a classic induction generator with a squirrel-cage rotor, this induction generator provides flexible regulation of energy flows. As a result, there is an increase in the power factor $\cos\varphi$ and efficiency. This, in turn, leads to a reduction in fuel consumption and an increase in the operating time of the installation. The use of an induction generator with a phase rotor and a connected inverter allows fuel consumption to be reduced by approximately 24.5% at 40% load and by 12.7% at 100% load. This allows for increased DGS operation time. For example, at 100% load, an automatic firefighting system can operate for 8.7 minutes longer compared to using a generator with a squirrel-cage induction generator.

Keywords: fire protection systems, protective structures, diesel generator sets, **induction** generator with phase rotor, autonomous power sources.

Вступ. Системи протипожежного захисту (СПЗ) є невід'ємними складовими комплексного забезпечення безпеки будівель і споруд, зокрема захисних споруд цивільного захисту (ЗЦЗ) та споруд подвійного призначення (СПП), таких як сховища, укриття, протирадіаційні захисні споруди тощо. Їх функціонування забезпечує збереження життя та здоров'я людей, підтримання життєво важливих процесів і мінімізацію ризику виникнення пожеж або вторинних небезпечних факторів у разі надзвичайних ситуацій. Ключовою передумовою стабільного функціонування СПЗ є гарантоване електроживлення, без якого ці системи не можуть виконувати свої функції, що знижує рівень безпеки об'єкта в цілому.

Попри те, що СПЗ та електроприймачі ЗСЦЗ та СПП за ступенем забезпечення надійності електропостачання належать до I категорії ДБН В.2.5-56 [1], ДБН В.2.2-5 [2], у сучасних умовах енергетичних викликів їх безперебійна робота набуває особливої актуальності. Це зумовлено тим, що Україна нині стикається з регулярними відключеннями електроенергії, спричиненими цілеспрямованими атаками на об'єкти енергетичної інфраструктури. Пошкодження або руйнування критичних елементів енергосистеми призводять до тривалих та масштабних перебоїв у електропостачанні, що спричиняє як планові, так і аварійні відключення в різних регіонах країни. У періоди таких тривалих відключень суттєво зростає ризик виникнення пожежі, ускладнюється

робота СПЗ, що може безпосередньо загрожувати життю та безпеці людей. За цих умов забезпечення надійного та довготривалого альтернативного електроживлення стає ключовою передумовою стійкого функціонування об'єктів цивільного захисту та критичної інфраструктури. Оскільки пожежна безпека вимагає миттєвого реагування, безперервного контролю та стабільної роботи інженерного обладнання, наявність резервних і автономних джерел живлення є необхідною умовою ефективного функціонування СПЗ в умовах надзвичайних ситуацій.

Отже, дослідження альтернативних джерел електроживлення із забезпеченням довготривалої автономної роботи для СПЗ, електроприймачів ЗСЦЗ та СПП є надзвичайно актуальним завданням як у теоретичному, так і в практичному аспекті. Такі дослідження дозволяють оцінити ефективність різних технічних рішень, визначити оптимальні підходи до резервування електроживлення та забезпечити підвищення рівня надійності, безпеки й стійкості будівель і споруд в умовах тривалих загроз і нестабільності енергетичної інфраструктури України.

Аналіз літературних джерел. У дослідженнях [3, 4-6] уже наголошується на доцільності інтеграції відновлюваних та резервних джерел енергії у системи безпеки. Зокрема, в роботі [3] зазначається, що використання сонячних і вітрових установок може суттєво підвищити стійкість інфраструктури під час пожеж та надзвичайних ситуацій. Таким чином, альтернативна енергетика розглядається як важливий інструмент забезпечення безперервності критичних функцій у надзвичайних ситуаціях.

У роботах [4-6] запропоновано модель автономного джерела живлення для систем протипожежного водопостачання, що може бути використане в умовах обмеженого енергопостачання. Вони доводять, що автономне електроживлення може забезпечити працездатність насосних станцій та пускових клапанів навіть при тривалому знеструмленні. Така модель є доречною для споруд цивільного захисту та сховищ, які часто функціонують у автономному режимі та повинні гарантувати безперебійну роботу протипожежних систем.

Необхідність обладнати об'єкти СПЗ визначається згідно з положеннями ДБН В.2.5-56 [1]. ЗСЦЗ та СПП також обладнуються СПЗ відповідно до вимог ДБН В.2.2-5 [2]. Відповідно до цього ДБН, приміщення, у яких розміщуються дизельні електростанції та запаси паливно-мастильних матеріалів, повинні бути оснащені СПЗ, а саме: системами пожежної сигналізації (СПС) та пожежогасіння, що забезпечують належний рівень пожежної безпеки під час їх експлуатації.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-56 [1], ДБН В.2.2-5 [2] для електроприймачів I категорії та особливої групи I категорії обов'язковою умовою є наявність резервного джерела живлення, здатного забезпечити безперервне електропостачання протягом визначеного часу. Наприклад, для деяких електроприймачів ЗСЦЗ – не менше ніж 48 годин. Як резервні джерела живлення можуть використовуватися генераторні установки (дизельні, бензинові, газові), джерела безперебійного живлення, акумуляторні батареї та інші автономні системи енергопостачання. Водночас, на практиці найбільш поширеними є генераторні установки, оскільки акумуляторні батареї зазвичай не забезпечують необхідної потужності для тривалої автономної роботи і застосовуються переважно для аварійного освітлення та живлення систем зв'язку. Останні події показують, що навіть СПС, які в якості другого джерела живлення використовують акумуляторні батареї, втрачають працездатність під час частих тривалих відключень електроенергії, оскільки акумуляторні батареї не встигають зарядитися. В якості другого джерела живлення для електродвигунів в автоматичних системах пожежогасіння, димо- та тепловидалення акумуляторні батареї не використовуються. Вони не забезпечують необхідної потужності протягом тривалого часу.

Бензинові генератори не придатні для тривалого безперервного використання та не застосовуються для забезпечення електроживленням СПЗ житлових і громадських будівель, ЗСЦЗ та СПП, відповідно до вимог ДБН В.2.5-23 [7]. Вони переважно використовуються, коли необхідно тимчасово забезпечити електроживлення під час нетривалих відключень електроенергії. Газові генератори також не використовуються для електроживлення цих об'єктів, оскільки їх надійність у надзвичайних умовах є недостатньою. Для тривалого режиму роботи газові генератори зазвичай необхідно підключати до магістральної мережі природного газу, що не може гарантувати стабільне електропостачання у разі бойових дій чи цілеспрямованих атак на енергетичну інфраструктуру. Альтернативою є використання зрідженого газу (пропан-бутану), проте запас пального має обмежений обсяг, а самі установки характеризуються підвищеною вибухо- та пожежонебезпечністю.

Для забезпечення довготривалої автономної роботи СПЗ та електроприймачів ЗСЦЗ в умовах аварійного та тривалого відключення основного електропостачання переважно використовують дизельні генераторні установки (ДГУ). В ДБН В.2.2-5 [2] та ДСТУ EN 12845 [8] чітко зазначено

про використання дизельних двигунів. Їх переваги: висока економічність, довговічність і надійність, стабільна робота та пожежна безпека. ДГУ призначені для живлення потужного обладнання, зокрема пожежних насосних установок. Вони забезпечують тривалу автономну роботу електродвигунів. Водночас акумуляторні батареї можуть забезпечувати миттєвий старт електродвигунів і підтримку електроживлення для систем управління, сигналізації та датчиків. Це дозволяє уникнути критичних затримок у подачі води і гарантує миттєвий захист об'єкта від поширення вогню. Насос має виходити на повний робочий режим протягом 15 с від початку запускання.

Отже, в умовах сучасних енергетичних викликів, пов'язаних із довготривалими перебоями електропостачання та обмеженими запасами палива, постає проблема збільшення часу автономної роботи ДГУ завдяки зменшенню витрат пального. Її вирішення можливе шляхом підвищення енергоефективності та покращення якості електричної енергії, що генерується установками. Саме тому актуальним напрямом наукових досліджень є удосконалення конструкції та керованості ДГУ, зокрема не лише через використання дизельних двигунів з більшим ККД, але й через використання генераторів з більшим ККД. Це дозволить зменшити витрати пального та продовжити час автономної роботи ДГУ.

При відомій електричній потужності і знизенні сумарного ККД ДГУ потреба в механічній потужності зростає, що збільшує витрату пального. Як правило, сумарний ККД ДГУ коливається від 30 до 55% (для великих низькошвидкісних установок), тоді як автономний ККД дизельного двигуна коливається від 35 до 50% та генератора змінного струму від 85 до 95% відповідно [9]. Широкий діапазон ККД дизельного двигуна головним чином пояснюється конструкцією, розміром або потужністю, механізмом контролю пального, робочою швидкістю, типом механізму охолодження та матеріалом конструкції. Однак ККД під час роботи відхиляється від розрахункового значення через умови навантаження, навколишні умови і методи експлуатації та технічного обслуговування.

В роботі [9] автори розглядають класичні ДГУ на основі двигунів внутрішнього згоряння, які оснащені синхронними генераторами. Для цих установок потрібна робота з фіксованою швидкістю. Вони працюють з низькою ефективністю під час роботи з низьким навантаженням. Це не є критичним у системах аварійного живлення, але дуже важливо в системах безперервної роботи, де споживання

пального є дуже важливим аспектом. Тому автори рекомендують концепцію Eo-Synchro. Це система керування, яка пропонує дуже оригінальний підхід, заснований на новій конструкції генератора. У концепції використовується новий нестатичний статор, де статор обертається навколо осі ротора.

У роботах [10-12] підкреслюється, що витрати пального у дизельному двигуні залежать від вихідної електричної потужності (навантаження), режиму експлуатації та швидкості обертання. Оптимізація швидкості обертання двигуна знижує питомі витрати пального приблизно на 30% для заданого навантаження і сумарні витрати пального у порівнянні з сталою швидкістю [10]. Із збільшенням активної потужності генератора абсолютна витрата пального зростає. Оптимальна питома витрата у гібридних системах досягається близько 70–90% від номінальної потужності [12].

ДГУ з асинхронними генераторами (АГ) із короткозамкнутим (КЗ) ротором характеризуються простою конструкцією, високою механічною надійністю, тривалим терміном служби та довговічністю. Вони є незамінними як автономні джерела основного або резервного електроживлення. Однак, в даних установках, можливості регулювання параметрів електричної енергії є обмежені. Параметри електричної енергії залежать від навантаження, стабільності обертів дизельного двигуна, ємності збудження. Вони потребують зовнішніх компенсаторів реактивної потужності для підтримання напруги в межах допустимих норм. У даних ДГУ на витрати пального впливає тип, нелінійність і величина навантаження. Нелінійні навантаження, пульсуючий крутний та електромагнітний момент, несиметричність фаз, гармоніки струму можуть збільшувати енергетичні втрати і, як наслідок, витрату пального двигуна [13, 14].

В статті [13] досліджують, як зменшити споживання пального в гібридній вітро-дизельній установці, коли є незбалансоване нелінійне навантаження. Дане навантаження створює несинусоїдальний струм і як наслідок небажані ефекти, такі як коливання напруги, відхилення частоти, пульсуючий крутний момент, збільшує коефіцієнти гармонійного забруднення та інші ефекти. Це може призвести до втрат енергії як у дизельних генераторах змінного струму, так і у вітрових асинхронних генераторах. Споживання пального збільшується порівняно з його нормальним значенням. Для зменшення кількості споживання пального, автори пропонують розподілити незбалансований та несинусоїдальний струм навантаження між джерелами живлення та навантаженням.

В роботі [14] автори досліджують автономну ДГУ з АГ із КЗ ротором та її витрати пального. В цій роботі розроблена математична модель даної установки, яка складається з математичних моделей підсистем дизельного двигуна з автоматичним регулятором швидкості, асинхронної машини, що працює в генераторному режимі, ємнісного самозбудження та навантаження. Ця математична модель дозволяє досліджувати якісні та кількісні показники роботи ДГУ.

Одним із рішень для економії пального в ДГУ є зміна швидкості двигуна відповідно до електричного навантаження [10]. Однак, у таких системах необхідно контролювати амплітуду напруги та відхилення частоти. У статті [15] зроблено аналіз та порівняння різних ДГУ зі змінною швидкістю двигуна. Зокрема порівнюються, синхронний генератор з постійними магнітами та з силовим електронним перетворювачем, синхронний генератор з постійними магнітами з обертовим статором, АГ з фазним ротором, синхронний генератор з фазним ротором та синхронний генератор з постійними магнітами з безступінчастою передачею. Було виявлено, що використання ДГУ зі змінною швидкістю двигуна та з напівпровідниковими перетворювачами залишається найпоширенішою технологією, незважаючи на те, що перетворювач вважається значним джерелом гармонік. Вибір тої чи іншої ДГУ залежить від таких факторів, як вартість початкових інвестицій, коливання навантаження, складність системи керування, чи підключена установка до електромережі, чи працює автономно тощо.

У роботах [16-18] автори досліджують та моделюють АГ з фазним ротором, в коло якого увімкнуті різного роду перетворювачі. Так робота [16] дає розуміння того, як керовані інвертори та їх регулятори можуть взаємодіяти з механікою ротора і як ці взаємодії слід враховувати при побудові стабільних схем для автономної роботи або при переходах між режимами. У роботі [17] автори підкреслили переваги двонаправленого перетворювача у колі ротора для незалежного регулювання активної й реактивної потужності. У роботі [18] проаналізовано поведінку АГ з фазним ротором та регульованою швидкістю під час трифазних провалів напруги. Результати цієї роботи важливі для оцінки поведінки автономних систем у разі сильних збурень і для проєктування захистів.

Отже, беручи до уваги залежність СПЗ, а також електроприймачів ЗСЦЗ та СПП від довготривалого безперебійного електроживлення, можна зробити висновок, що питання забезпечення тривалої автономності цих систем і об'єктів сьогодні має стратегічне значення.

Мета дослідження. Збільшення часу автономної роботи ДГУ для СПЗ ЗСЦЗ та СПП за рахунок покращення якості електричної енергії, що, своєю чергою, зумовлює зменшення витрат пального. Досягнення зазначеної мети передбачається шляхом використання АГ з фазним ротором, у коло якого інтегровано інвертор та систему самозбудження, що забезпечує підвищення коефіцієнта потужності та коефіцієнта корисної дії генератора.

Задачі дослідження:

1. Розробити в MATLAB модель автономного АГ з інвертором у колі фазного ротора та самозбудженням для ДГУ.

2. На моделі дослідити, як змінюються параметри електричної енергії, зокрема коефіцієнт корисної дії (η_{gen}) та коефіцієнт потужності генератора ($\cos\varphi$), залежно від зміни активно-індуктивного навантаження та реакцію системи на зміну швидкості приводного вала.

3. Оцінити ефективність застосування АГ з інвертором у колі фазного ротора за показниками коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, ККД генератора η_{gen} на витрати пального та тривалість автономної роботи ДГУ.

4. Порівняти доцільність використання АГ з фазним ротором, в коло ротора якого інтегровано інвертор порівняно з АГ із КЗ ротором.

Методи досліджень. У ході дослідження застосовано методи аналізу та опрацювання результатів наукових досліджень, публікацій та рекомендацій науковців, які вивчають сучасні підходи до побудови АГ з КЗ ротором та АГ з інвертором у фазному роторі, а також теорію електричних машин.

Для розробки моделі автономного АГ з інвертором у колі фазного ротора використовувався пакет Simulink в середовищі MATLAB. Пакет Simulink – це середовище блок-схеми для моделювання, проєктування, імітації та аналізу динамічних систем, включаючи дискретні, неперервні та гібридні, нелінійні та розривні системи.

Для обчислення витрат пального дизельного генератора з асинхронним навантаженням використовує загально відому залежність [19]:

$$V_f = f(P, \eta_{gen}, \eta_{dv}, \cos\varphi, be)$$

тобто, витрати пального залежать від активної потужності P (Вт або кВт), коефіцієнта потужності генератора $\cos\varphi$, ККД дизельного двигуна η_{dv} і генератора η_{gen} та питомої витрати пального be .

Генератор видає повну потужність:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}, \quad (1)$$

де S – повна потужність, кВА.

У свою чергу

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

де Q – реактивна потужність, [ВАр].

Отже, компенсуючи Q можна збільшити $\cos\varphi$.

Витрати пального ДГУ прямо пов'язані з механічною потужністю дизельного двигуна, яку він передає на вал генератора:

$$P_{\text{дв}} = \frac{S}{\eta_{\text{ген}} \eta_{\text{дв}}}. \quad (2)$$

Підставимо вираз (1) у (2), отримаємо

$$P_{\text{дв}} = \frac{P}{\eta_{\text{ген}} \eta_{\text{дв}} \cos\varphi}. \quad (3)$$

Як видно з виразу (3), при зменшенні $\cos\varphi$ потужність дизельного двигуна $P_{\text{дв}}$ зростає, оскільки зростає повна потужність генератора S (1), а отже дизельний двигун повинен передавати більший момент і як наслідок спалює більше пального.

Об'ємна витрата пального [19]

$$V_f = \frac{\dot{m}_f}{\rho}, \quad (4)$$

де $\dot{m}_f = b_e \cdot P_{\text{дв}}$ – масова витрата пального, кг/с, ρ – густина пального, кг/л.

Якщо питомі витрати пального b_e виражено в г/кВт·год (для активної потужності), то фактична витрата:

$$V_f = \frac{P \cdot b_e}{1000 \rho \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{дв}} \cos\varphi}. \quad (5)$$

Як видно з виразу (5), зменшення $\cos\varphi$ веде до росту повної потужності, струму і втрат у системі. Це знижує загальний ККД ДГУ і підвищує витрати пального на 5–30%. Отже, при низькому $\cos\varphi$, генератор споживає більше пального при тій самій активній потужності, струм більший, втрати в міді та залізі більші і дизель компенсує ці додаткові втрати.

Порівняльну оцінку ефективності ДГУ з АГ з фазним ротором, в коло ротора якого інтегровано інвертор проведено шляхом зіставлення отриманих результатів з АГ із КЗ ротором.

Результати. Збільшення тривалості роботи, підвищення вимог до стабільності та якості електричної енергії в автономних системах живлення СПЗ і електроспоживачів об'єктів ЗСЦЗ та СПП вимагає пошуку нових технічних рішень для ДГУ. Як уже зазначалося, одним із перспективних напрямів є використання АГ із фазним ротором, у коло якого інтегровано інвертор з акумуляторною батареєю та систему самозбудження (рис. 1). Така структура забезпечує розширені можливості керування електромагнітними процесами в машині, покращує якість електричної енергії за широкого спектра навантажень і режимів роботи та підвищує її експлуатаційну надійність, а отже зменшує навантаження на дизельний двигун. Як результат це дозволить зменшити витрати пального, стабілізувати параметри напруги й струму та продовжити час автономної роботи електроспоживачів.

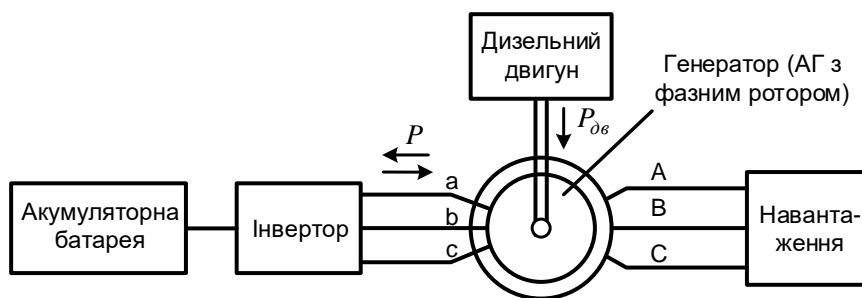


Рисунок 1 – Структурна схема ДГУ з АГ з фазним ротором та інвертором

На рис. 2 представлена модель автономного АГ з фазним ротором та з самозбудженням за рахунок інвертора в колі ротора, розроблена у пакеті Simulink в середовищі MATLAB. Вона об'єднує всі необхідні компоненти для забезпечення надійної генерації електроенергії та регулювання параметрів напруги. У моделі реалізовано дворівневий інвертор з незалежним живленням та враховано нелінійність кривої намагнічування АГ. Крім того, створено моделі широтно-імпульсного модулятора, який управляє

процесом перемикання ключів трифазного дворівневого інвертора, блока активно-індуктивного навантаження, регулятора напруги інверторного типу в колі ротора та реалізовано можливість налаштування кута відкриття транзисторів.

Представлена схема силового трифазного інвертора включає шість потужних транзисторів. Цей блок може живитися від акумуляторної батареї. Інвертор забезпечує можливість ефективного керування вихідною напругою на

затискачах генератора та підтримання стабільності в умовах змінного навантаження.

Модель трифазного активно-індуктивного навантаження дозволила імітувати різні режими роботи, що впливають на затискачі АГ. Ця модель дає змогу проводити симуляцію як виключно активного навантаження, так і комбінованого активно-індуктивного типу. Також реалізовано можливість під'єднання навантаження у

конкретний момент часу за допомогою електронних ключів. Активний опір у системі дорівнює 10 Ом, а індуктивність навантаження становить 0,001 Гн, що еквівалентно імпедансу 0,314 Ом для частоти мережі 50 Гц. Такий підхід дозволяє оптимально налаштувати навантаження, забезпечуючи ефективну симуляцію різних режимів експлуатації автономного генератора.

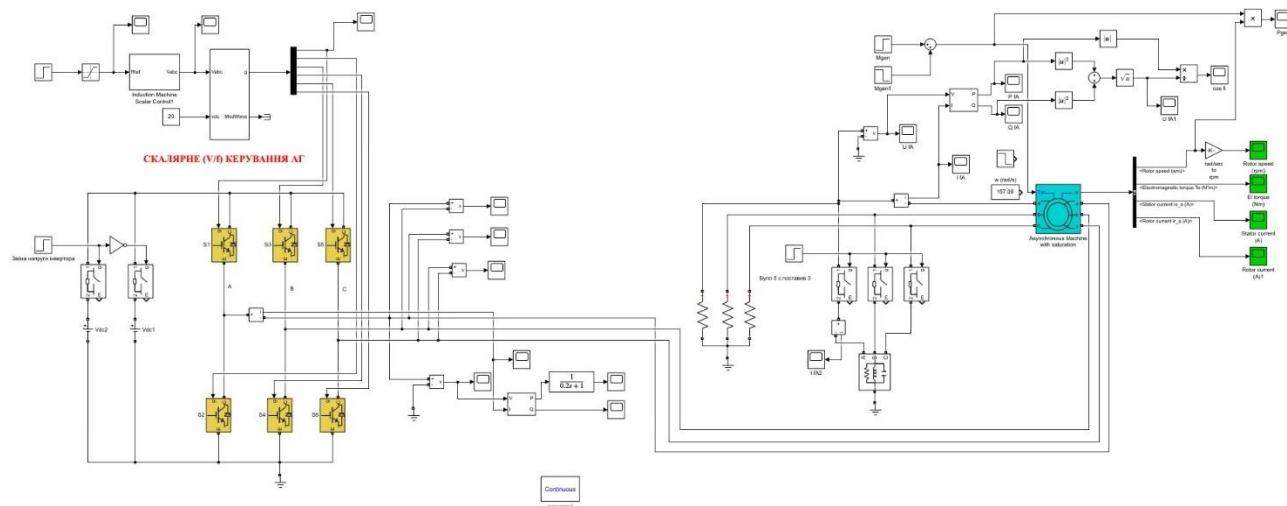


Рисунок 2 – Модель автономної ДГУ з асинхронним генератором із самозбудженням та інвертором у колі фазного ротора

Ця модель дозволяє реєструвати та аналізувати такі параметри, як швидкість обертання ротора, значення електромагнітного моменту, струм, що проходить через статор та ротор, а також активну та реактивну потужність для кожної окремої фази, $\cos\phi$ та $\eta_{ген}$. Ця модель дозволяє також досліджувати вплив різних типів навантажень на роботу генератора, оцінюючи стабільність напруги та частоти при зміні активної та індуктивної складових навантаження. На рисунку також показано, як вимірвальні блоки інтегровані у фазу А, що дозволяє наочно побачити підключення та методику збору даних. Зібрані дані забезпечують можливість моніторингу та корекції роботи генератора, дозволяючи в подальшому оптимізувати процес самозбудження та частоту інвертора в колі ротора для забезпечення стабільної вихідної напруги і витрату пального дизельного двигуна.

В якості основної компоненти для моделювання була обрана асинхронна машина потужністю 37 кВт. Модель включає введення таких параметрів, як номінальна напруга, частота, кількість полюсів, активний і індуктивний опори обмоток статора та ротора, а також інші характеристики, які визначають динамічну поведінку АГ в процесі роботи. Це дозволяє максимально наблизити модель до реальних умов експлуатації та забезпечити коректну роботу АГ під час запуску,

самозбудження та подальшого режиму роботи з навантаженням.

В роботі реалізовано скалярне керування АГ у колі ротора. Модуль керування скалярним методом АГ базується на реалізації концепції підтримання співвідношення напруги до частоти V/f. Для інвертора задається необхідна частота f_s , яка використовується для отримання бажаного значення напруги, дотримуючись принципу співвідношення V/f.

Першим етапом досліджування є моделювання роботи автономного АГ в умовах раптового накиду навантаження. Цей режим є критичним для оцінки надійності та адаптивності системи до змін навантаження в реальному часі, а також оцінки зміни $\cos\phi$ та $\eta_{ген}$. Моделювання проведено для інтервалу часу з 1,5 до 2 секунд, коли до генератора приєднується додаткове навантаження.

У цьому сценарії швидкість обертання приводного вала встановлена на рівні, що дорівнює 157 рад/с, і під час прикладання навантаження цей показник залишається стабільним. Частота роботи інвертора в роторному колі встановлена на рівні 1,8 Гц, що сприяє забезпеченню необхідної напруги в процесі самозбудження. Напруга інвертора 20 В. Попри те, що в проміжок між 1,5 та 2 секундами система піддається значному навантажуванню, швидкість обертання приводного вала залишається незмінною. В момент часу $\approx 1,65$ с напруга

інвертора зростає до 22 В, щоб підняти напругу на затискачах до номінального рівня. Затримка підвищення напруги інвертора на 0,5 с зумовлена необхідністю проаналізувати природну стійкість системи.

На рис. 3а представлено графік перехідного процесу миттєвих значень фазної напруги АГ у

фазі А миттєвих значеннях в діапазоні часу від 0 до 3,5 с. На рис. 3б представлено перехідний процес активної потужності у фазі А. На рис. 3в зображено динаміку зміни електромагнітного моменту АГ. На рис. 3г представлено перехідний процес $\cos\varphi$.

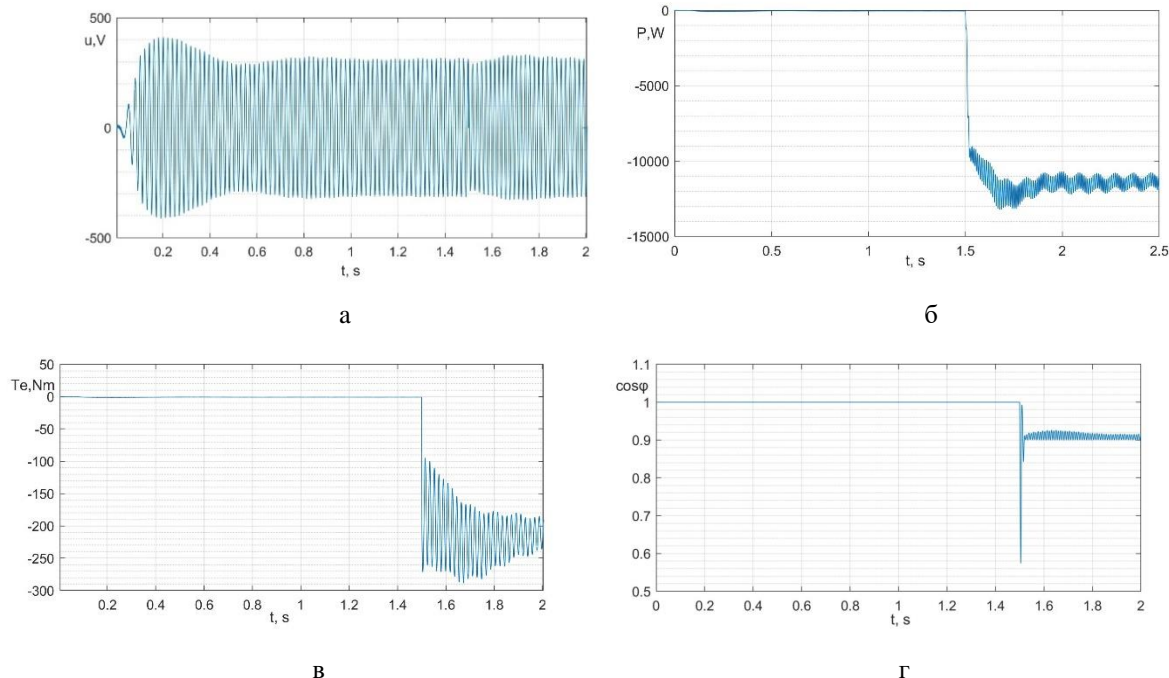


Рисунок 3 – Перехідні процеси системи в режимі накиду навантаження

Другим етапом дослідження є моделювання роботи автономного АГ в умовах раптового падіння швидкості приводного вала. Цей режим також є критичним для оцінки надійності та адаптивності системи до змін навантаження в реальному часі, а також зміни $\cos\varphi$ та $\eta_{ген}$. Моделювання проведено для інтервалу часу з 2 до 3,5 секунд із наведеними вище параметрами. У цьому режимі, як і раніше, генератор використовує лише інвертор для самозбудження. В момент часу 2 с швидкість обертання вала стрибкоподібно зменшується на 10 % і дорівнює 141,37 рад/с. В момент часу 2,5 с

напруга інвертора зростає до 53 В, щоб підняти напругу на затискачах АГ до номінального рівня. Затримка підвищення напруги інвертора на 0,5 с зумовлена необхідністю проаналізувати природну стійкість системи.

На рис. 4а представлено графік перехідного процесу миттєвих значень фазної напруги АГ у фазі А миттєвих значеннях в діапазоні часу від 0 до 3,5 с. На рис. 4б – перехідний процес активної потужності у фазі А. На рис. 4в – динаміку зміни електромагнітного моменту АГ. На рис. 4г – перехідний процес фазного струму в роторі у фазі А.

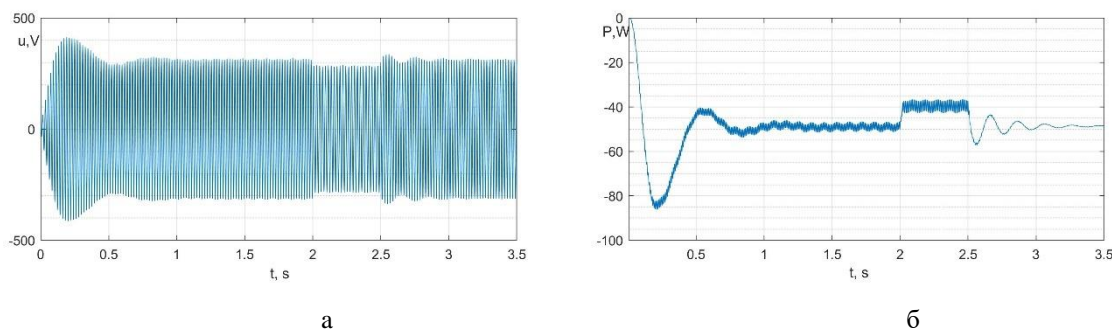
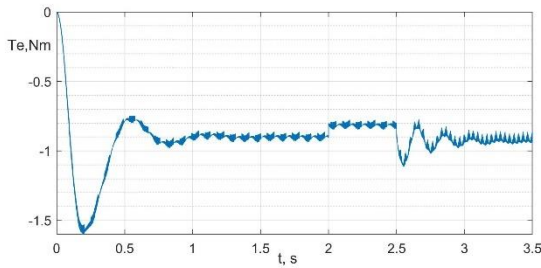
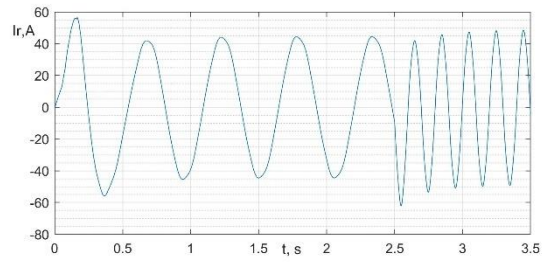


Рисунок 4 – Перехідні процеси системи в режимі раптового падіння швидкості приводного вала



В



Г

Продовження рисунка 4 – Перехідні процеси системи в режимі раптового падіння швидкості приводного вала

Наступним етапом дослідження є розрахуємо витрати пального ДГУ за виразом (5), коли у системі використовується АГ з КЗ ротором і АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора. Прийнемо для усіх випадків $\rho = 0,85$ кг/л. ККД дизельного двигуна:

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_e}{\dot{m}_f \cdot LHV}, \quad (6)$$

де $LHV = 42500$ кДж/кг – нижча теплота згорання пального, кДж/кг.

Або через питому витрату пального b_e :

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{3600}{b_e \cdot LHV}. \quad (7)$$

У табл. 1 наведені результати цифрового моделювання ДГУ коли використовувався АГ з КЗ ротором і АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора.

Таблиця 1

Результати цифрового моделювання ДГУ із АГ з КЗ ротором і АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора

Навантаження, %	$P_{\text{ген}}$, кВт	$P_{\text{дв}}$, кВт	b_e	$\eta_{\text{дв}}$	$\eta_{\text{ген}}$ з к.з. ротор.	cosφ з к.з. ротор.	V_f , л/год, з к.з. ротор	$\eta_{\text{ген}}$ з фаз. ротор.	cosφ з фаз. ротор.	V_f , л/год з фаз. ротор	Економія, %	$t_{\text{роб}}$, хв
40	14,8	18,3	245	0,346	0,8	0,7	22,02	0,91	0,815	16,62	24,49	19,46
50	18,5	22,8	230	0,368	0,82	0,75	22,12	0,92	0,815	18,14	17,98	13,15
60	22,2	27,4	215	0,394	0,84	0,78	21,75	0,918	0,83	18,7	14,01	9,77
70	25,9	32	205	0,413	0,85	0,8	22,24	0,923	0,86	19,05	14,33	10,04
80	29,6	36,5	200	0,424	0,86	0,82	23,29	0,929	0,88	20,09	13,74	9,56
90	33,3	41,1	198	0,428	0,87	0,84	24,8	0,923	0,89	22,06	11,04	7,44
100	37	45,7	202	0,42	0,87	0,84	28,65	0,93	0,9	25,01	12,69	8,72

На рис. 5 показано залежності витрати пального дизельного двигуна від навантаження для ДГУ із АГ з КЗ ротором та АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора. Отже:

- при низькому $\cos\phi$ збільшується повна потужність (1), тобто дизельний двигун мусить компенсувати реактивну енергію, що знижує ефективність;

- менший $\eta_{\text{ген}}$ означає більші електричні втрати в обмотках і нагрів, які дизель компенсує підвищеним крутним моментом;

- інвертор у колі фазного ротора дозволяє утримувати оптимальний $\cos\phi$ і $\eta_{\text{ген}}$ навіть при змінних навантаженнях.

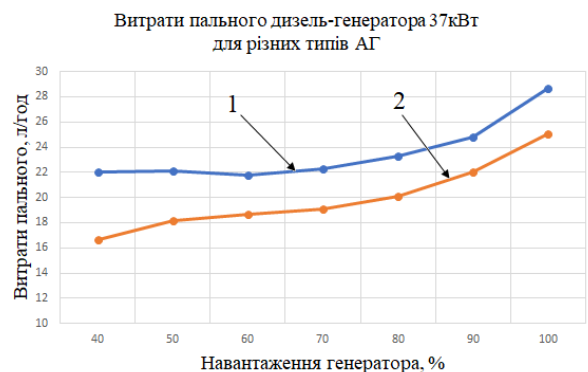


Рисунок 5 – Графік залежності витрати пального ДГУ 37 кВт від навантаження: 1 – АГ з КЗ ротором; 2 – АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора

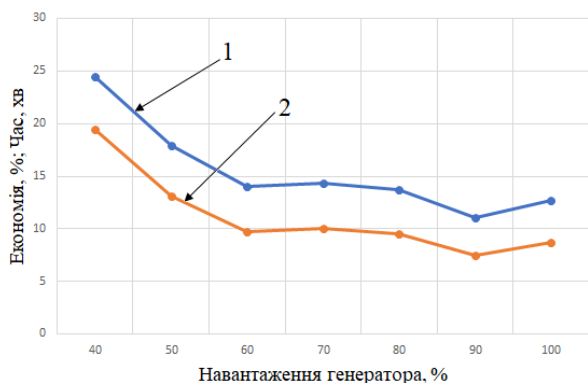


Рисунок 6 – Графік залежності економії пального та продовження часу роботи ДГУ 37 кВт від навантаження: 1 – економія; 2 – додаткова тривалість роботи

На рис. 6 показано залежності економії пального та часу роботи дизельного двигуна від навантаження порівняного із запропонованим рішенням, коли використовується АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора замість АГ з КЗ ротором.

Обговорення. Як видно з рис. 3 у режимі підключення активно-індуктивного навантаження було зафіксовано невелике зниження напруги разом зі зростанням фазного струму, однак система залишалася стабільною без потреби в додаткових засобах регулювання. Завдяки підвищенню напруги інвертора, параметри напруги на затискачах генератора були повернуті до початкового рівня. $\cos\varphi$ зменшився до 0,9. Це моделювання демонструє здатність автономного АГ забезпечувати стабільну роботу та оптимальне значення $\cos\varphi$ при різких змінах навантаження за умови незалежного живлення інвертора навіть для розімкнутої системи. Завдяки цьому генератор зберігає стійкість до самозбудження, що є ключовим для забезпечення ефективного та безперебійного енергопостачання споживачів.

З рис. 4 видно, що АГ забезпечує стабільну роботу при різких змінах швидкості обертання приводного вала за умови незалежного живлення інвертора навіть для розімкнутої системи. При зниженні швидкості двигуна також спостерігалось незначне зменшення напруги та збільшення струму. Цей режим проходив стабільно, а напругу знову вдалося вирівняти завдяки інвертору.

Отримані результати свідчать про правильну конфігурацію системи для забезпечення стабільного самозбудження. Вона готова до подальших експериментів із різними режимами роботи. Стабільна генерація реактивної потужності забезпечує підтримання напруги у прийнятних межах, а отже забезпечує більші значення $\cos\varphi$ та $\eta_{ген}$, навіть при змінюваних умовах навантаження та швидкості приводного вала порівняно з АГ з КЗ ротором.

Отже, на відміну від АГ з КЗ ротором, АГ з фазним ротором та інверторним керуванням забезпечують активне регулювання вихідної напруги й частоти навіть за змінної швидкості обертання дизельного двигуна або коливань навантаження. Здатність інвертора компенсувати зміну частоти й напруги покращує якість живлення і зменшує потребу в зовнішніх компенсаторах реактивної потужності. Додатковою перевагою таких систем є можливість самозбудження завдяки інверторній системі керування, що також забезпечує формування магнітного поля без використання зовнішніх джерел живлення. Усе це дозволяє підтримувати стабільні електричні параметри без застосування складних компенсуючих пристроїв. На відміну від традиційних АГ із КЗ ротором, які не мають власної системи керування реактивною потужністю і часто залежать від зовнішніх джерел. Компенсація реактивної потужності дозволяє збільшити $\cos\varphi$, а отже зростає ККД генератора та зменшуються витрати пального.

З кривих на рис. 6 видно, що при 40% навантаженні економія пального становить $\approx 24,5\%$, а при 100% навантаженні – $\approx 12,7\%$. При повному навантаженні дизельний двигун працює у більш оптимальному режимі, тому різниця скорочується до $\approx 12,7\%$. Отже, при 40% навантаженні ДГУ із АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора порівняно з АГ з КЗ ротором економить пального 5,4 л/год, а при 100% навантаженні – 3,64 л/год. Це дозволяє збільшити тривалість роботи ДГУ (рис. 6, крива 2). Наприклад, при 100% навантаженні автоматична система пожежогасіння може працювати на 8,7 хв довше. За 8,7 хв автоматична система пожежогасіння здатна повністю загасити пожежу.

Отже, отримані результати моделювання дозволяють оцінити роботу генератора в різних експлуатаційних сценаріях і підтверджують можливість використання автономного АГ з фазним ротором та інвертором у колі ротора для забезпечення живленням СПЗ, електроприймачів ЗСЦЗ та СПП у нестабільних умовах із продовженням часу їх роботи при одних і тих самих витратах пального.

Висновки. У пакеті Simulink в середовищі MATLAB розроблена модель АГ з фазним ротором, у коло якого інтегровано інвертор та систему самозбудження. Ця модель дає змогу детально аналізувати роботу автономного генератора в різних умовах експлуатації. Зокрема: модель дає змогу досліджувати вплив різних типів навантажень на роботу генератора, оцінюючи стабільність напруги, частоти, $\cos\varphi$ та $\eta_{ген}$ при зміні активної та індуктивної складових навантаження; можна аналізувати ефективність

системи компенсації реактивної потужності, що здійснюється за допомогою інвертора в колі ротора, яка підтримує необхідний рівень реактивної потужності для оптимальної роботи генератора.

Застосування АГ з фазним ротором, у коло якого інтегровано інвертор та систему самозбудження, є технологічно досконалішою альтернативою класичним АГ із КЗ ротором. Його застосування у складі ДГУ забезпечує гнучке регулювання енергетичних потоків. Це призводить до зниження пульсацій моменту, покращення якості генерованої електроенергії та зменшує механічне навантаження на двигун. У результаті спостерігається підвищення $\cos\varphi$ та загального ККД системи, зменшуються витрати пального та збільшується ресурс дизельного двигуна. Це своєю чергою підвищує паливну економічність системи. Використання АГ з фазним ротором і підключеним інвертором дозволяє при 40% навантаженні зменшити витрати пального приблизно на 24,5%, а при 100% навантаженні – на 12,7%, що збільшує тривалість роботи ДГУ. Наприклад, при 100% навантаженні автоматична система пожежогасіння може працювати на 8,7 хв довше порівняно з використанням ДГУ з АГ із КЗ ротором.

Таким чином, проведене дослідження має практичну та теоретичну цінність. Забезпечення електроживленням СПЗ для ЗСЦЗ та СПП протягом тривалого часу у період воєнного часу та частих блекаутів дозволяє забезпечити безпеку людей.

Список літератури:

1. Системи протипожежного захисту. Зі зміною №1 та №2 : ДБН В.2.5-56:2014 [Чинний від 01.03.2026]. *Мінрозвитку України*, 2025. 97 с.
2. Захисні споруди цивільного захисту. Зі зміною № 1 та №2 : ДБН В.2.2-5:2023. [Чинний від 01.04.2025]. *Мінрозвитку України*, 2023. 115 с.
3. Кодрик А., Борисов А., Тітенко О., Іллюченко П. Особливості гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю альтернативних джерел енергії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023. №1(15). С. 128–140.
[https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).128-140](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).128-140).
4. Боднар Г. Й., Шаповалов О. В. Розробка автономного джерела живлення для протипожежних систем внутрішнього водопостачання. *Пожежна безпека*. Львів, 2012. №20. С. 180-186.
<https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/712>.
5. Шаповалов О.В., Кравець І.П., Кушнір А.П. Підвищення надійності роботи

внутрішнього протипожежного водопостачання. *Пожежна безпека*. Львів, 2016. №28. С.133-139.
<https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/237>.

6. Шаповалов О.В., Лин А.С., Кравець І.П., Кушнір А.П. Оптимізація електричних параметрів автономного джерела електроживлення внутрішнього протипожежного водопостачання з акумуляторними батареями. *Пожежна безпека*. Львів, 2017. №30. С.174-180. Retrieved із
<https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/26>.

7. Проектування електроустановок житлових будинків та громадських будівель і споруд : ДБН В.2.5-23:2025. [Чинний від 01.01.2026]. *Мінрозвитку України*, 2025. 93 с.

8. Стационарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи. Проектування, встановлення та обслуговування : ДСТУ EN 12845:2022. [Чинний від 31.12.2023]. ДП “УкрНДНЦ”, 2022. 215 с.

9. Issa M., Fiset J., Mobarra M., Ibrahim H., and Pinca A. Optimizing the performance of a 500kW Diesel Generator: Impact of the Eo-Synchro concept on fuel consumption and greenhouse gases. *Power Engineering Journal*. 2018. PP. 22-31.
https://www.researchgate.net/publication/333093031_Optimizing_the_Performance_of_a_500KW_Diesel_Generator_Impact_of_the_Eo-Synchro_Concept_on_Fuel_Consumption_and_Greenhouse_Gases

10. Saponaro G., Stefanizzi M., D’Amato D., Franchini E., Fornarelli F., Torresi M., and Camporeale S.M. Modeling and design optimization of a hybrid power generator for full-electric naval propulsion. *Journal of physics*. 2022. Vol. 2385, no. 1. 012087.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012087>.

11. Razak S., and Normanyo E. Modelling and Simulation of an Electric Motor-Generator Set for Internal Combustion Engine Replacement. *Applications of Modelling and Simulation*/. 2021. Vol. 5. PP. 134–144.
http://arqiiipubl.com/ojs/index.php/AMS_Journal/article/view/271

12. Kusakana K., and Vermaak H. Hybrid diesel generator/renewable energy system performance modelling. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 67. PP. 97–102.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.025>

13. Sivakumar P., Ron Carter SB., Jai Sreedhar G., Jainam S Mardia, Lokesh KB., and Aswini A. Enhancing Performance and Energy Efficiency of Diesel-Induction Generator System under Linear and Nonlinear Load Conditions. *International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE)*. 14-15

December 2023, Madurai, India. <https://doi.org/10.1109/ICEMCE57940.2023.10434194>

14. Zachepa I., Chenchevoi V., Zachepa N., Chencheva O., & Serhienko S. Study of a local source of autonomous power supply on the basis of a diesel generator. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. №6. PP. 56-73. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002566>.

15. Raisa Barbosa, Mohamad Issa, Sidelmo Silva, & Adrian Ilinca. Variable Speed Diesel Electric Generators: Technologies, Benefits, Limitations, Impact on Greenhouse Gases Emissions and Fuel Efficiency. *Journal of Energy and Power Technology*. 2022. Vol. 4, Issue 1. PP. 1-23. <https://doi.org/10.21926/jept.2201003>.

16. Xiong, X., Luo, B., Li, L., Sun, Z., & Blaabjerg, F. Impedance Reshaping Method of DFIG System Based on Compensating Rotor Current Dynamic to Eliminate PLL Influence. *IEEE Transactions on Power Electronic*. 2024. Vol. 39, Issue 4. PP. 1006-1016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3346042>.

17. Metello E., Fernando Bento Silva, Raul Vitor Arantes Monteiro, José Mateus Rondina, & José Mateus Rondina. Study of a Self-Excited Three-Phase Induction Generator Operating as a Single-Phase Induction Generator for Use in Rotating Excitation Systems for Synchronous Generators. *Energies*. 2024. Vol. 17, Issue 16, 3900. <https://doi.org/10.3390/en17163900>.

18. Bansal, R.C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005. Vol. 20, Issue 2. PP. 292–299.

19. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hill, 1988. 920 p.

References:

1. Systemy protypozhezhnogo zakhystu. Zi Zminoiu №1 ta №2 [Fire protection systems. With Amendments No. 1 and No. 2]. (2025). DBN B.2.5-56:2014 from 1d March 2026. Kyiv: Minrozvytku Ukrainy [in Ukrainian].

2. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. Zi zminoiu № 1 ta №2 [Civil defense protective structures. With Amendments No. 1 and No. 2]. (2023). DBN B.2.2-5:2023 from 1d April 2024. Kyiv: Minrozvytku Ukrainy [in Ukrainian].

3. Kodryk, A., Borysov, A., Titenko, O., & Illiuchenko, P. (2023). Osoblyvosti hasinnia pozhehzha na ob'iektakh i sporudakh iz naiavnistiu alternatyvnykh dzherel enerhii. [Features of fire extinguishing at objects and buildings using alternative energy sources]. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(15), 128–140. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).128-140](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).128-140).

4. Bodnar, G.I., & Shapovalov, O.V. (2012). Rozrobka avtonomnoho dzherela zhyvlennia dlia protypozhezhnykh system vnutrishnoho vodopostachannia. [Development autonomous power sources for fire-fighting systems of internal water supply]. *Fire Safety*, 20, 181-187. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/712> [in Ukrainian].

5. Shapovalov O., Kravets I., & Kushnir A. (2016). Pidvyshennia nadiinosti roboty vnutrishnoho protypozhezhnoho vodopostachannia. [Reliabilization of the internal fire-fighting water supply system]. *Fire Safety*, 28, 133-139. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/237> [in Ukrainian].

6. Shapovalov O., Lyn A., Kravets I., & Kushnir A. (2017). Optyimizatsiia elektrychnykh parametriv avtonomnoho dzherela elektrozhyvlennia vnutrishnoho protypozhezhnoho vodopostachannia z akumuliatornymy batariami. [Optimization of electrical parameters of the autonomous source of electric power supply of internal fire-fighting water supply with accumulated batteries]. *Fire Safety*. 30, 174-180. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/26>. [in Ukrainian].

7. Proiektuvannia elektroustanovok zhytlovykh budynkiv ta hromadskykh budivel i sporud [Design of electrical installations of residential buildings and public buildings and structures]. (2025). DBN B.2.5-23:2025 from 1d January 2026. Kyiv: Minrozvytku Ukrainy [in Ukrainian].

8. Statsionarni systemy pozhehzhasinnia. Avtomatychni sprynklerni systemy. Proiektuvannia, vstanovlennia ta obsluhovuvannia. [Fixed firefighting systems - Automatic sprinkler systems - Design, installation and maintenance]. (2022). DSTU EN 12845:2022 from 31d December 2023. Kyiv: DP "UkrNDNTs" [in Ukrainian].

9. Issa, M., Fiset, J., Mobarra, M., Ibrahim, H. & Ilinca, A. (2018). Optimizing the performance of a 500kW Diesel Generator: Impact of the Eo-Synchro concept on fuel consumption and greenhouse gases. *Power Engineering Journal*, 22-31. https://www.researchgate.net/publication/333093031_Optimizing_the_Performance_of_a_500KW_Diesel_Generator_Impact_of_the_Eo-Synchro_Concept_on_Fuel_Consumption_and_Greenhouse_Gases

10. Saponaro G., Stefanizzi M., D'Amato D., Franchini E., Fornarelli F., Torresi M., & Camporeale S.M. (2022). Modeling and design optimization of a hybrid power generator for full-electric naval propulsion. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385(1), 012087. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012087>.

11. Razak, S., & Normanyo, E. (2021). Modelling and Simulation of an Electric Motor-Generator Set for Internal Combustion Engine Replacement, *Applications of Modelling and Simulation*, 5, 134–144. http://arqiiipubl.com/ojs/index.php/AMS_Journal/article/view/271
12. Kusakana, K., & Vermaak, H. (2014). Hybrid diesel generator/renewable energy system performance modelling. *Renewable Energy*, 67, 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.025>
13. Sivakumar, P., Ron Carter SB, Jai Sreedhar G, Jainam S Mardia, Lokesh KB, & Aswini, A. (2023). Enhancing Performance and Energy Efficiency of Diesel-Induction Generator System under Linear and Nonlinear Load Conditions. *International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE)*, December 14-15, Madurai, India. <https://doi.org/10.1109/ICEMCE57940.2023.10434194>
14. Zachepa, I., Chenchevoi, V., Zachepa, N., Chencheva, O., & Serhiienko, S. (2022). Study of a local source of autonomous power supply on the basis of a diesel generator. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 56-73. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002566>.
15. Barbosa, R., Issa, M., Silva, S., & Ilinca, A. (2022). Variable Speed Diesel Electric Generators: Technologies, Benefits, Limitations, Impact on Greenhouse Gases Emissions and Fuel Efficiency. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.21926/jept.2201003>.
16. Xiong, X., Luo, B., Li, L., Sun, Z., & Blaabjerg, F. (2024). Impedance Reshaping Method of DFIG System Based on Compensating Rotor Current Dynamic to Eliminate PLL Influence. *IEEE Transactions on Power Electronic*, 39(4), 1006-1016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3346042>.
17. Metello E., Fernando Bento Silva, Raul Vitor Arantes Monteiro, José Mateus Rondina, & José Mateus Rondina. (2024). Study of a Self-Excited Three-Phase Induction Generator Operating as a Single-Phase Induction Generator for Use in Rotating Excitation Systems for Synchronous Generators. *Energies*, 17(16), 3900. <https://doi.org/10.3390/en17163900>.
18. Bansal, R.C. (2005). Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2), 292–299.
19. Heywood, J.B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York : McGraw-Hill.

© А. П. Кушнір, Б. Л. Копчак, В. М. Оксентюк
 Р. В. Алешко, А. І. Мандюк, 2026.
Науково-методична стаття.
 Надійшла до редакції 20.03.2026.
 Прийнята до друку 29.04.2026.
 Опублікована 25.05.2026.