

УДК 621.311.6:621.316.717:34.01/09

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359883

**ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МОБІЛЬНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З КОМБІНОВАНИМ ПУСКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ**

- Кулагін Д.О.** д-р техн. наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3610-4250>, e-mail: [kulagindo@gmail.com](mailto:kulagindo@gmail.com);
- Маслов І.З.** канд. техн. наук, доцент, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1759-6077>, e-mail: [maslovigor@i.ua](mailto:maslovigor@i.ua);
- Дєвочкін В.Ф.** аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2381-5245>, e-mail: [vdev@zp.edu.ua](mailto:vdev@zp.edu.ua)

У роботі розглянуто науково-практичні аспекти побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок із комбінованими пусковими джерелами в умовах змінних навантажень та несприятливих температурних факторів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності стартерного пуску дизель-генераторних установок, зниження енергетичних втрат та покращення експлуатаційних характеристик транспортної техніки. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка методології проектування енергоефективних систем електростартерного пуску на основі комбінованих джерел електроживлення. Для досягнення поставленої мети вирішено комплекс завдань, пов'язаних із аналізом існуючих технічних рішень, розробкою математичних моделей енергетичних процесів, дослідженням перехідних режимів та обґрунтуванням вибору накопичувачів енергії. У процесі дослідження застосовано методи системного аналізу, математичного моделювання, техніко-економічної оцінки та структурної декомпозиції енергетичних систем. Особливу увагу приділено аналізу взаємодії акумуляторних батарей і ємнісних накопичувачів енергії, оптимізації розподілу потоків потужності та мінімізації втрат у процесах генерації, передачі та споживання електроенергії. Розглянуто особливості побудови комбінованих систем пуску, включаючи топологію електричних мереж, алгоритми керування та нормативно-технічні вимоги до їх функціонування. Узагальнені результати дослідження свідчать, що використання комбінованих джерел живлення забезпечує підвищення ефективності пускових процесів, скорочення тривалості запуску та зменшення питомих витрат палива до 8,5%. Запропоновано підходи до оптимізації структури енергосистеми, що дозволяють підвищити її надійність та енергоефективність за рахунок раціонального керування енергетичними потоками та компенсації реактивної потужності. У висновках обґрунтовано наукову новизну, яка полягає у формуванні комплексної методології проектування комбінованих систем електростартерного пуску з урахуванням динамічних режимів роботи та нормативних обмежень. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження отриманих результатів при проектуванні та модернізації мобільних енергоустановок. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, пов'язані з удосконаленням алгоритмів управління, розширенням функціональних можливостей накопичувачів енергії та підвищенням загальної ефективності транспортних енергетичних систем.

**Ключові слова:** електропостачання; енергоустановка; суперконденсатори; енергоефективність; енергетичні втрати; математичне моделювання; дизель-генератор; електричні машини та апарати.

**Постановка проблеми**

Проблема забезпечення гарантованого стартерного пуску дизельних енергетичних установок в умовах від'ємних температур навколишнього середовища залишається одним із найбільш критичних аспектів експлуатації транспортних засобів та спеціалізованої техніки різного цільового призначення [1]. Аналіз світового досвіду та результатів широкої експлуатаційної практики підтверджує наявність суттєвих технологічних труднощів, що призводять до значного ускладнення або повної неможливості запуску двигунів при термічних навантаженнях [1-3]. Дана проблема охоплює переважну частину сучасного парку техніки, оснащеної класичними електричними стартерними системами, що обумовлює необхідність пошуку нових

технічних рішень для підвищення надійності енергозабезпечення пускових режимів.

У зимовий період експлуатації ефективність функціонування системи пуску двигуна внутрішнього згорання нівелюється внаслідок синергетичного впливу двох домінуючих факторів. З одного боку, спостерігається інтенсивне зростання динамічної в'язкості моторних оли, що провокує кратне збільшення моменту опору прокручуванню колінчастого вала та вимагає від стартера значно вищих значень крутного моменту. З іншого боку, низькотемпературний вплив деструктивно позначається на кінетиці електрохімічних процесів у традиційних свинцево-кислотних акумуляторних батареях. Це призводить до різкого скорочення їхньої ефективної ємності та критичного падіння максимальної сили розрядного струму, що в сукупності створює

дефіцит потужності в найбільш енергоємний момент пуску [3, 4].

Перспективним напрямом розв'язання окресленої проблеми та інтенсифікації процесу стартерного пуску є інтеграція в бортову мережу комбінованих систем енергоживлення, де основна акумуляторна батарея функціонує спільно з додатковими високопотужними накопичувачами електричної енергії. Ключова перевага сучасних компонентів накопичення енергії, зокрема суперконденсаторів або іоністорів, полягає у їхній винятковій питомій потужності, яка на порядки перевищує відповідний показник хімічних джерел струму [1, 5]. Така фізична властивість дозволяє системі миттєво генерувати високі пікові струми, що є критично важливим для подолання інерції та початкового опору механізмів двигуна у фазі зрушення.

Поряд із високими динамічними характеристиками, напівпровідникові накопичувачі енергії характеризуються певними обмеженнями, зокрема нижчими показниками питомої енергоємності порівняно з акумуляторами. Крім того, низька номінальна напруга одиничного елемента накопичувача обумовлює необхідність проектування складних схем послідовно-паралельного з'єднання окремих осередків для формування модулів із заданими робочими параметрами. Реалізація таких комбінованих систем вимагає ретельного узгодження характеристик усіх компонентів енерговузла для досягнення оптимального балансу між потужністю, енергоємністю та габаритними параметрами пускового пристрою.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Рационалізація використання комбінованих систем енергоживлення, що поєднують у собі традиційні акумуляторні батареї та сучасні накопичувачі електричної енергії, відкриває широкі можливості для оптимізації пускових режимів [2, 6]. За такої архітектури побудови системи на початковій, найбільш енергоємній фазі запуску, основне навантаження на стартер забезпечується саме за рахунок накопичувачів. Це дозволяє ефективно розвантажити акумуляторну батарею від руйнівних пікових струмів, які є головним чинником прискореної деградації активної маси пластин та виходу джерела струму з ладу. Таким чином, впровадження буферних накопичувачів не лише гарантує впевнений запуск, а й суттєво пролонгує загальний експлуатаційний ресурс акумуляторів, мінімізуючи їх внутрішній знос [4, 7].

В умовах інтенсивної щоденної експлуатації транспортних засобів, яка характеризується циклічністю та багатократними пусками двигуна протягом короткого часу, виникає додаткова проблема – дефіцит заряду акумуляторних батарей [8]. Штатні генераторні установки, як правило, обмежені у своїй здатності забезпечувати швидке та повне відновлення енергії в коротких інтервалах між робочими циклами, особливо за низьких температур, коли здатність акумулятора

приймати заряд різко знижується [3, 9]. З огляду на це, актуальним науково-прикладним завданням є дослідження та розробка спеціалізованих типів накопичувачів, спроможних не лише до екстремально швидкої віддачі енергії, а й до оперативного відновлення своїх робочих параметрів від бортової мережі в паузах між запусками [10, 11].

Окреслений комплекс проблем диктує необхідність розробки інноваційних топологій підключення та інтелектуальних алгоритмів управління комбінованими системами «акумуляторна батарея – накопичувач енергії» [12, 13]. Створення таких адаптивних систем є критичною умовою для підвищення експлуатаційної надійності та економічної ефективності дизельної техніки, що працює в суворих кліматичних регіонах [14, 15]. Незважаючи на наявність окремих досліджень у цій галузі, питання комплексного узгодження параметрів накопичувачів із динамічними характеристиками бортової мережі та специфікою пускових процесів залишається недостатньо вивченим, що підтверджує актуальність та своєчасність обраного напрямку дослідження.

#### Мета статті

Головною метою представленого дослідження є наукове обґрунтування та розробка цілісної методології проектування енергоефективної системи електростартерного пуску дизель-генераторних енергетичних установок, що базується на використанні комбінованих джерел електропостачання. Реалізація цієї мети спрямована на подолання технологічних бар'єрів, пов'язаних із нестабільністю пускових характеристик автономних систем генерації в умовах змінного навантаження та несприятливих зовнішніх чинників.

Досягнення визначеної мети передбачає послідовне вирішення низки взаємопов'язаних наукових та практичних завдань. Першочерговим завданням є теоретичне формування комплексної методології побудови енергоефективних систем пуску, що враховує динамічну взаємодію між джерелами накопичення енергії різної фізичної природи та стартерним вузлом дизель-генератора. Це передбачає розробку математичних моделей та алгоритмів, які б дозволили оптимізувати розподіл потоків потужності в межах комбінованого джерела для мінімізації втрат енергії та забезпечення стабільної частоти обертання вала двигуна на етапі запуску.

Важливим етапом дослідження є критичний аналіз існуючих та перспективних варіантів схемної реалізації комбінованих джерел живлення. Розгляд архітектурних рішень дозволяє визначити найбільш раціональні способи інтеграції накопичувачів у структуру електростартерного пуску, враховуючи специфіку роботи дизель-генераторних установок. Такий підхід забезпечує формування універсальних рекомендацій щодо комплектування систем пуску дизельної техніки, що

сприяє підвищенню її експлуатаційної готовності та загальної енергетичної ефективності.

### Матеріали та методи

Проблема комплексної оптимізації енергетичних потоків у спеціалізованих транспортних системах, орієнтована на мінімізацію енерговитрат та собівартості генерованої потужності, становить науково-практичну основу проектування високоефективних комплексів електростартерного пуску. Реалізація подібних систем, що функціонують у межах комбінованої силової установки на базі дизель-генератора та блоку акумуляторних батарей, вимагає формування багаторівневих алгоритмів управління. Методологічний базис такого управління передбачає послідовну розробку математичного апарату для опису статистики й динаміки як системи в цілому, так і її ключових вузлів, створення аналітичної моделі для оцінки техніко-економічної ефективності процесів генерації та споживання, а також безпосередню програмну реалізацію керуючих впливів. Раніше розроблені математичні моделі перехідних процесів у вузлах комбінованого джерела живлення дозволяють перейти до комплексного аналізу енергетичних режимів.

Оцінка вартісних показників та ефективності розподілу енергії у транспортних мережах дає можливість визначити ступінь досконалості функціонування системи за умови безумовного забезпечення пускових характеристик привідного агрегату та дотримання нормативних вимог до якості електроенергії. Подібний синергетичний підхід, що об'єднує фундаментальні закони електродинаміки та принципи економічної теорії, є критично важливим для інтегрованих електроенергетичних систем, які забезпечують живлення специфічних споживачів транспортного засобу. Сучасні вимоги до таких комплексів включають не лише традиційну надійність, безпеку та експлуатаційну технологічність, а й підвищену енергоефективність, що обумовлено необхідністю мінімізації втрат у процесах багаторазового перетворення та передачі енергії від дизель-генераторної установки й накопичувачів до стартерного вузла.

Структурна організація транспортної енергетичної системи традиційно базується на ієрархічному принципі, що охоплює рівні від первинних джерел і головних розподільних пристроїв до локальних споживачів та кінцевих шин. Кожен із цих рівнів характеризується специфічними методами розрахунку електричних параметрів та проектними допусками. Застосування диференційованого підходу до аналізу втрат активної потужності на кожному ієрархічному етапі дозволяє отримати адекватну оцінку енергетичного балансу системи. З точки зору дослідження електростартерного пуску доцільно сегментувати загальну енергосистему на фрагменти, що включають джерела живлення (дизель-генератор та АКБ), внутрішні магістралі та мережі безпосередніх споживачів. Така класифікація

дозволяє ідентифікувати найбільш енергоємні ділянки та локалізувати зони максимальних втрат у процесі передачі потужності.

Архітектура системи електропостачання транспортного засобу детермінована номінальною напругою, конфігурацією допоміжних агрегатів та необхідним ступенем безперервності процесу пуску. Передавальна інфраструктура, представлена кабельними лініями та шинопроводами, може бути реалізована за радіальною або магістральною схемою. Радіальні ланцюги забезпечують найвищу надійність для критично важливих вузлів системи пуску, тоді як магістральні та змішані схеми дозволяють оптимізувати масогабаритні та вартісні характеристики бортової мережі. У контексті комбінованого живлення використання гібридних топологій мереж дозволяє найбільш гнучко управляти розподілом енергії між генераторною установкою та акумуляторами.

Системний аналіз транспортної електроенергетики має виходити за межі стандартного енергоаудиту, який часто розглядає елементи ізольовано. Ефективна стратегія енергозбереження в системах електростартерного пуску вимагає врахування нерозривного взаємозв'язку процесів перетворення та споживання енергії. Інтегрований підхід передбачає, що декомпозиція системи на функціональні фрагменти має суворо відповідати її фізичній структурі та специфіці технологічних режимів роботи дизельного двигуна й електричних накопичувачів. Це дозволяє врахувати унікальні динамічні характеристики кожної транспортної підсистеми та сформулювати адаптивні алгоритми управління, що забезпечують максимальний ККД пускового циклу. Запропонована концепція структуризації та моделювання створює необхідні умови для синтезу систем управління, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи комбінованого джерела живлення, мінімізуючи деградацію акумуляторів та витрату палива дизель-генератором при збереженні необхідної динаміки пуску.

Процес передачі енергії в електричних магістралях транспортного засобу неминуче поєднаний із втратами активної потужності, обумовленими фундаментальними електромагнітними та тепловими явищами у провідних елементах і силовому обладнанні. Стосовно системи електростартерного пуску з комбінованим живленням, існуюча класифікація енерговтрат базується на етіології їх виникнення. Первинна група втрат включає базові складові, детерміновані номінальними режимами роботи компонентів гібридної установки при розрахункових експлуатаційних параметрах, а також додаткові втрати, що виникають внаслідок стохастичних відхилень поточних режимів пуску від заданих специфікацій.

Друга група деструктивних факторів, що впливають на енергетичний баланс системи «дизель-генератор – акумулятор – стартер», класифікується за такими напрямками: структурна недосконалість архітектури силового ланцюга, циркуляція реактивної потужності

в елементах системи, нераціональність алгоритмів управління технологічними циклами у вузлах транспортного засобу, деградація показників якості електроенергії та системні дефекти в організації енергорозподілу. Під структурною недосконалістю в контексті вискоєфективного пуску розуміється відсутність комплексних науково-обґрунтованих підходів до вибору номінальної потужності агрегатів, визначення топологічних координат точок підключення джерел живлення (АКБ та генератора) та оптимізації перерізів струмоведучих ліній, що в сукупності зумовлює інтегральний рівень енергозбереження системи.

### Виклад основного матеріалу

Транспортування реактивної потужності крізь елементи мережі, що мають активний опір, провокує не лише прямі енергетичні втрати, а й викликає низку деструктивних ефектів, критичних для пускових режимів. До них належать зниження пропускну здатності розподільних пристроїв та дестабілізація рівнів напруги, що безпосередньо позначається на крутному моменті стартера. Мінімізація таких перетоків досягається впровадженням систем компенсації реактивної потужності, що в межах транспортного засобу трансформується у комплекс інженерних завдань: від зниження власного реактивного споживання виконавчих механізмів до визначення оптимальних локацій і режимів роботи компенсуювальних пристроїв.

Практична реалізація стратегії енергозбереження в транспортних мережах охоплює широкий спектр конструктивних заходів. Ключовими серед них є оптимізація коефіцієнта завантаження силових агрегатів, впровадження обмежувачів холостого ходу для допоміжних приводів та застосування сучасних напівпровідникових перетворювачів із раціональними алгоритмами керування. Особлива увага приділяється якості сервісного обслуговування електричних машин та доцільності використання синхронних двигунів. Індивідуальна компенсація реактивної потужності безпосередньо біля потужних споживачів пускового комплексу дозволяє суттєво розвантажити бортову мережу та підвищити загальну енергоефективність циклу при живленні від комбінованого джерела.

Стратегічною метою модернізації систем електростартерного пуску є радикальне зниження рівня енергетичних втрат. Формування переліку заходів має здійснюватися ітераційно, охоплюючи етапи генерації технічних рішень, селекції їх комбінацій та визначення цільової функції за суворого дотримання граничних умов роботи дизель-генератора й акумуляторів. Сукупність схемотехнічних рішень, що мінімізують втрати при передачі потужності, утворює фундамент для створення динамічно трансформованої енергетичної інфраструктури. Такий підхід дозволяє адаптувати параметри системи до варіативних умов експлуатації, забезпечуючи гнучке управління потоками енергії.

Важливим фактором є взаємна кореляція змін у структурі енергосистеми. Повна заміна обладнання часто виявляється економічно невиправданою через високу вартість компонентів, що зумовлює необхідність пошуку компромісних рішень. Незважаючи на типізацію проектів для певних класів транспорту, кожен конкретний агрегат потребує індивідуального підходу до ранжування заходів за критерієм питомої економії. Для кількісної оцінки інновацій доцільно використовувати апарат техніко-економічного аналізу, де пріоритет надається сценаріям із максимальним чистим дисконтованим доходом, що дозволяє оцінити довгострокову вигоду з урахуванням вартості капіталу та ризиків.

Методологія реалізації програми енергозбереження включає формування множини технічних заходів, порівняльний аналіз їх параметрів та ранжування за мірою зменшення вартості заощадженого ресурсу. При цьому поточні експлуатаційні витрати зіставляються з капітальними вкладеннями, а термін окупності проекту стає вирішальним критерієм при виборі топології мережі або типу накопичувачів. Особлива увага приділяється потенціалу енергозбереження, який визначається як різниця між фактичними втратами у поточній конфігурації та прогнозованими показниками в оптимізованій моделі. Це дозволяє ідентифікувати технічний резерв системи та розрахувати конкретні значення економії палива і ресурсу акумуляторів.

Математичний опис процесів у системах із комбінованим живленням вимагає створення адекватного аналітичного аналога, що враховує специфіку режимів дизель-генератора та батарей. Для системного управління рівнем втрат пропонується прогностична модель, де ключовим параметром є сумарні ефективні втрати енергії на етапах генерації, розподілу та споживання. Структурний синтез моделі та функціональної залежності визначаються допустимою похибкою апроксимації, що корелює з класом точності вимірювальних комплексів. Важливою задачею є прогнозування динаміки втрат при варіації топології силової частини у довгостроковій перспективі.

Вибір методу розрахунку енерговтрат базується на стабільних даних про активні опори елементів заміщення. Залежно від повноти інформації можуть застосовуватися детерміновані, ймовірнісні або статистичні підходи. В умовах визначеності параметрів пріоритетним є детермінований метод, де інтегральні втрати активної енергії розраховуються як добуток втрат потужності в режимі максимального струму на тривалість пікових навантажень. Принципи декомпозиції дозволяють розділити систему на рівні: шини генератора, розподільні пристрої, магістралі та стартерні двигуни. Сумарні втрати визначаються як сума енергії, втраченої на кожному ієрархічному етапі.

Для детального аналізу енергоефективності конкретних вузлів втрати розраховуються шляхом додавання показників на всіх елементарних ділянках мережі. Струмове навантаження безпосередньо залежить від співвідношення повної потужності та напруги, а

питомий опір – від фізичних властивостей матеріалу та перерізу провідників. Геометричні параметри розраховуються на основі координат вузлів із застосуванням принципу найкоротшої відстані, проте з урахуванням технічних обмежень щодо потужності агрегатів та просторових лімітів транспортного засобу.

Особлива увага приділяється топологічній оптимізації, що враховує зони, заборонені для монтажу обладнання. Для опису таких ділянок використовується метод розділення площини, де обмеження задаються логічними функціями. Якщо розрахункові координати елемента потрапляють у таку зону, система інтерпретує це як порушення компоновальних вимог. Такий підхід дозволяє автоматизувати проектування, мінімізуючи втрати за рахунок вибору оптимальних шляхів передачі потужності при суворому дотриманні конструктивних обмежень. Цей етап формування теоретичного базису дозволяє перейти до безпосередньої алгоритмізації процесів управління в гібридних системах пуску. Підключення накопичувального пристрою до загальної шини постійного струму приймається на основі схеми, наведеної на рис. 1.

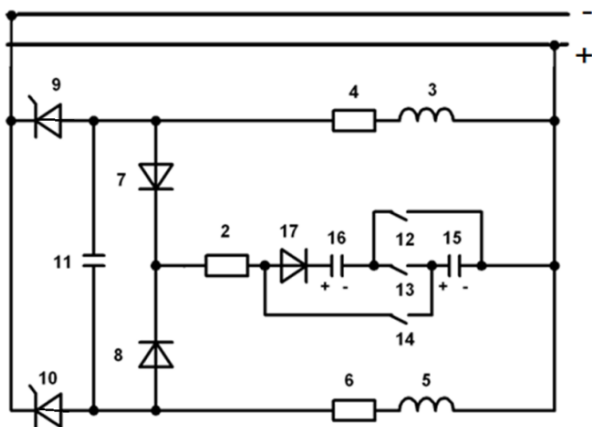


Рис. 1 – Схема підключення накопичувального пристрою до загальної шини постійного струму дизель-генераторної енергетичної установки

Функціонування представленої схеми базується на принципах імпульсного перетворення енергії для оптимізації процесу накопичення заряду. З метою підвищення загального коефіцієнта корисної дії системи живлення використовується спеціалізований зарядний пристрій, робота якого ґрунтується на властивостях електромагнітного дроселя. У такому режимі енергія, що надходить із загальної шини постійного струму (1), по чергово акумулюється в індуктивних елементах – дроселях (3) та (5), після чого через напівпровідникові діоди (7) та (8) спрямовується до накопичувальних ємностей (15) та (16). Накопичення енергії в дроселі триває до моменту досягнення встановленого граничного значення максимального струму, після чого за допомогою тиристорних ключів (9) або (10) відбувається

розрив кола, що змушує струм примусово протікати безпосередньо через конденсаторний блок.

Керування періодичністю відкриття та закриття тиристорів здійснюється автоматизованим блоком управління, який адаптує параметри комутації до поточного стану системи. Для забезпечення гнучкого регулювання рівня напруги в процесі енергообміну накопичувальна ємність розділена на дві ідентичні частини. Тривалість розряду індуктивності у замкненому контурі  $L-C$  безпосередньо детермінується величиною ємності  $C$  та миттєвим значенням напруги на ній. Характерною особливістю такого процесу є те, що зростання напруги при одночасному зменшенні ємнісного показника сприяє прискоренню розряду дроселя, що дозволяє оперативно керувати динамікою пускових режимів.

Для детального вивчення електромагнітних процесів доцільно розглянути розрахункову схему заміщення стартерної мережі (рис. 2), де джерело живлення представлено електрорушійною силою акумулятора  $E$ .

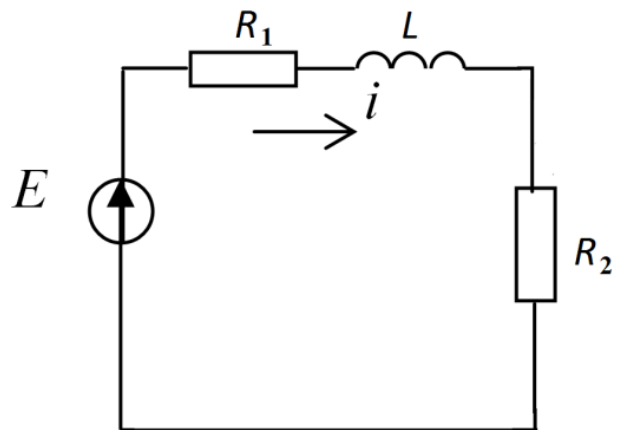


Рис. 2 – Схема заміщення стартерної мережі

У межах даної моделі стартерний вузол умовно апроксимується через еквівалентні значення індуктивності та активного опору обмоток його якоря, що в поєднанні з комплексним опором стартерної мережі формує повну структуру ланцюга. Така схематизація дозволяє аналізувати статичні та динамічні характеристики системи при стандартному варіанті живлення.

Подальший розвиток розрахункової моделі передбачає інтеграцію конденсаторного накопичувача у структуру базової схеми заміщення (рис. 3).

Це дає можливість перейти до комплексного дослідження режимів комбінованого стартерного пуску, аналізуючи розподіл енергетичних потоків між акумуляторною батареєю та додатковим джерелом енергії. Додавання ємнісного елемента суттєво змінює характер перехідних процесів, оскільки дозволяє компенсувати падіння напруги в моменти пікових навантажень, що є вирішальним фактором для забезпечення

надійного запуску дизель-генераторної установки в ускладнених експлуатаційних умовах.

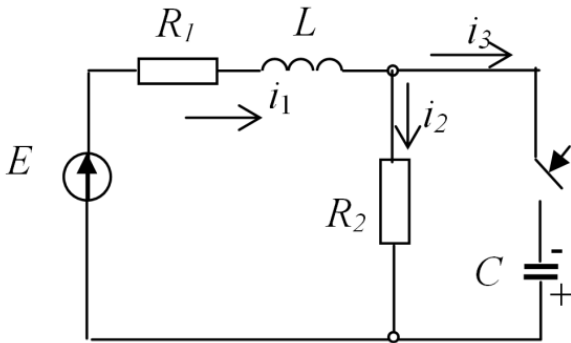


Рис. 3 – Схема заміщення стартерної мережі із накопичувальною ємністю

Оскільки напруга на конденсаторі є сумою установленої та вільної складових напруги, то

$$u_C = u_{Cy} + u_{C6}. \quad (1)$$

Після комутації  $i_3 = 0$ ,  $i_1 = i_2$ .

$$u_{Cy} = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2. \quad (2)$$

$$u_{C6}(t) = A_1 e^{pt} + A_2 t e^{pt}. \quad (3)$$

Тоді:

$$\begin{cases} u_C = u_{Cy} + A_1 e^{pt} + A_2 t e^{pt}; \\ \frac{du_C}{dt} = pA_1 e^{pt} + pA_2 t e^{pt} + A_2 e^{pt}. \end{cases} \quad (4)$$

Для  $t = 0$

$$\begin{cases} u_C(0) = u_y + A_1; \\ \frac{du_C}{dt} \Big|_{t=0} = pA_1 + A_2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{du_C}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{i_3(0)}{C}. \quad (6)$$

Величина  $i_1(0)$

$$i_1(0) = i_1(0^-) = \frac{E}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Для  $t = 0$   $i_2(0) = \frac{u_C(0)}{R_2}$ . Тоді  $i_3(0) = i_1(0) - i_2(0)$ .

Отже

$$i_3 = C \frac{du_C}{dt} = C(pA_1 e^{pt} + pA_2 t e^{pt} + A_2 e^{pt}). \quad (8)$$

Струм другої гілки

$$i_2 = \frac{u_C(t)}{R_2}. \quad (10)$$

Струм першої гілки

$$i_1 = i_2 + i_3. \quad (11)$$

На основі отриманих аналітичних виразів та запропонованої методики оцінки впливу впроваджуваних заходів на паливну ефективність було проведено розрахунок показників для дизель-генераторної енергоустановки Caterpillar 3516. Практичне застосування розробленої системи стартерного пуску, що базується на поєднанні традиційних акумуляторних батарей та ємнісних накопичувачів, дозволяє суттєво інтенсифікувати процес запуску двигуна. Основний ефект досягається завдяки форсуванню пускових режимів від накопичувальної системи, що призводить до помітного скорочення тривалості перехідних процесів та виходу установки на стабільні оберти холостого ходу.

Під час проведення розрахунків за базовий показник було прийнято дані виробника, згідно з якими питома витрата палива в момент пуску становить 350 г/кВт·год. Отримані результати порівняльного аналізу витрат палива для стандартної та комбінованої систем енергозабезпечення систематизовано та наведено у табл. 1. В якості вихідних даних для моделювання обрано параметри дизель-генераторної енергоустановки Caterpillar 3516 відповідно до [16–19]. Моделювання проводилось засобами Matlab з використанням математичної моделі [2, 3]. При цьому під час моделювання було враховано технічне обмеження, згідно з яким підвищення пускової частоти обертання колінчастого вала на величину, що перевищує 20%, є неприпустимим через ризик виникнення надмірних механічних навантажень на деталі циліндро-поршневої групи та елементи приводу.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики запуску дизеля

| Зміна частоти обертання вала стартера за рахунок енергії накопичувальної системи, % | Питома витрата палива на запуск, г/кВт·год | Показник щодо зміни питомої витрати палива на запуск, % |
|---|--|---|
| 0   | 350  | 0   |
| +10   | 336,35                                     | -3.9  |
| +15   | 330,05                                     | -5.7  |
| +20   | 320,25                                     | -8.5  |

Нормативне забезпечення проектування та побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок із комбінованим пусковим джерелом базується на сукупності галузевих стандартів, вимог до електромагнітної сумісності та специфікацій безпеки автономних енергетичних систем. Основним завданням нормативної бази є регламентація параметрів якості

електроенергії, надійності комутаційної апаратури та захисту інтегрованих накопичувачів енергії в умовах динамічних навантажень.

Процес побудови комбінованих систем пуску регулюється стандартами, що визначають ієрархічну структуру бортової мережі та правила інтеграції різно-рідних джерел живлення. Нормативні документи вимагають чіткого розмежування силових ланцюгів стартерного пуску та кіл оперативного живлення систем автоматики. При використанні комбінованого джерела, що поєднує акумуляторні батареї та суперконденсаторні модулі, особлива увага приділяється забезпеченню селективності захисту. Кожен рівень ієрархії, від головних розподільних пристроїв до локальних шин споживачів, повинен відповідати вимогам щодо термічної та електродинамічної стійкості до струмів короткого замикання, які у системах із суперконденсаторами можуть значно перевищувати показники традиційних мереж.

Нормативні особливості експлуатації накопичувачів енергії у складі мобільних установок диктують суворі правила щодо їх зарядних та розрядних циклів. Згідно з вимогами до енергоефективності, системи керування повинні забезпечувати такий розподіл потоків потужності, при якому пікові пускові струми нівелюються за рахунок високої питомої потужності накопичувача, що регламентується стандартами серії ISO та відповідними державними стандартами з експлуатації транспортної техніки. Важливим аспектом є нормативне обмеження на рівень напруги на шинах постійного струму: відхилення від номінальних значень у моменти комутації накопичувача не повинні перевищувати встановлених допусків для запобігання збоєм у роботі мікропроцесорних систем керування двигуном.

Використання напівпровідникових перетворювачів (DC/DC-конверторів) для узгодження параметрів АКБ та накопичувачів вводить систему в поле дії нормативів з електромагнітної сумісності. Імпульсні завади, що генеруються пристроями заряду дросельного типу, мають бути локалізовані та відфільтровані відповідно до міжнародних стандартів, таких як IEC 61000. Крім того, конструктивне виконання блоків накопичувачів повинно відповідати нормам вібrostійкості та удароміцності, що є критичним для мобільних енергоустановок. Особлива увага в нормативній базі приділяється пожежній безпеці та запобіганню перегріву електрехімічних елементів, що вимагає впровадження обов'язкових систем термічного моніторингу та аварійного відключення джерел у разі виходу параметрів за межі безпечного експлуатаційного коридору.

Нормативний підхід до оцінки ефективності систем пуску передбачає порівняльний аналіз фактичних втрат активної енергії із прогнозованими показниками енергозбереження. Методологія вибору типу накопичувача та схеми його підключення базується на розрахункових коефіцієнтах готовності та надійності, що регламентуються для спеціалізованої техніки. У процесі проектування обов'язковим є дотримання обмежень

щодо компонування обладнання, зокрема виключення можливості розміщення силових агрегатів у обмежених зонах транспортного засобу, що визначається нормами пасивної безпеки та ергономіки. Такий комплексний нормативний контроль забезпечує не лише високий ККД пускового циклу, а й гарантує тривалий термін служби всіх компонентів комбінованої системи електропостачання.

---

### Результати та їх обговорення

---

Результати дослідження підтверджують, що раціональне керування потоками енергії у комбінованому джерелі живлення забезпечує досягнення граничної економії палива на рівні до 8,5% на один цикл запуску. Таке зниження витрат ресурсів не лише покращує техніко-економічні показники експлуатації установки Caterpillar 3516, а й опосередковано сприяє зменшенню екологічного навантаження за рахунок скорочення викидів продуктів неповного згоряння палива у фазі нестационарної роботи двигуна.

---

### Висновки

---

Сформульовано засадничі принципи проектування високоефективних транспортних систем електростартерного пуску з комбінованим живленням. Встановлено, що базисом побудови таких комплексів є мінімізація енергетичних витрат та собівартості генерованої потужності в бортових мережах. Реалізація цього завдання вимагає розробки багаторівневих алгоритмів управління, що ґрунтуються на послідовному моделюванні статичних і динамічних процесів як у системі в цілому, так і в її окремих вузлах, включаючи дизель-генераторну установку та блок акумуляторних батарей. У межах дослідження обґрунтовано доцільність декомпозиції енергосистеми на функціональні фрагменти, що дозволяє деталізувати структуру втрат у кожному відсіку транспортного засобу та розробити адресні енергозберіжні заходи без порушення цілісності загального енергетичного балансу.

Ідентифіковано ключові фактори виникнення енергетичних втрат в інтегрованих транспортних мережах змінного струму. Процес передачі потужності до пускових пристроїв неминує супроводжується втратами активної енергії, обумовленими тепловими та електромагнітними явищами у провідниках і силовому обладнанні. Особливу увагу приділено деструктивному впливу реактивної потужності, циркуляція якої крізь активні опори мережі провокує падіння напруги та зниження пропускної здатності розподільних трактів. Доведено, що елімінація цих ефектів є досяжною через комплексну компенсацію реактивної енергії, яка включає оптимізацію режимів роботи бортових споживачів, вибір раціональних точок підключення компенсуювальних пристроїв та використання сучасних алгоритмів керування перетворювальною технікою.

## Перелік використаних джерел

- [1] Kulagin D., Maslov I. Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 07–11 October 2024. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991>.
- [2] Kulagin D., Maslov I. Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 6, no. 8(138). Pp. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.345066>.
- [3] Kulagin D., Maslov I. Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant. *Problemele Energeticii Regionale*. 2025. Iss. 4. Pp. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.02>.
- [4] Zhu Z. Q., Howe D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 95, no. 4. Pp. 746–765. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.892482>.
- [5] Chen Z., Wang H., Yan Y. A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59, no. 9. Pp. 3588–3595. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2159951>.
- [6] Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles / C. C. Chan et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43, no. 2. Pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.491357>.
- [7] Cai W. Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting, Seattle, WA, USA, 03-07 October 2004. Article 393. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348437>.
- [8] Liu C., Chau K. T., Jiang J. Z. A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, no. 12. Pp. 4055–4064. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044128>.
- [9] Finch J. W., Giaouris D. Controlled AC Electrical Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 2. Pp. 481–491. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911209>.
- [10] Chau K. T., Chan C. C. Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, no. 4. Pp. 821–835. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.890114>.
- [11] Ehsani M., Rahman K. M., Toliyat H. A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997. Vol. 44, no. 1. Pp. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.557495>.
- [12] Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives / J. M. Miller et al. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis, MO, USA, 12-15 October 1998. Vol. 1. Pp. 513–523. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.1998.732360>.
- [13] Khan F. H., Tolbert L. M., Webb W. E. Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-Clamped Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56, no. 8. Pp. 3079–3095. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2022074>.
- [14] Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application / C. A. Ferreira et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. Vol. 31, no. 3. Pp. 553–561. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.382116>.
- [15] Chan C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2002. Vol. 90, no. 2. Pp. 247–275. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.989873>.
- [16] Energy Storage Systems for Automotive Applications / S. M. Lukic et al. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55, no. 6. Pp. 2258–2267. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390>.
- [17] Industrial Diesel Engines 3516. URL: [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html) (accessed 29.06.2025).
- [18] Macari N. C., Richardson R. D. Operation of a Caterpillar 3516 Spark-Ignited Engine on Low-Btu Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1987. Vol. 109, no. 4. Pp. 443–447. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3240061>.
- [19] Lam H., Richter M., Ashton G. A New Approach to Maximize the Potential of Reciprocating Engines Operating on Bio-Fuel Energy. *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, USA, 7–10 August 2011. Paper No: ES2011-54496. 2012. Pp. 1149-1158. DOI: <https://doi.org/10.1115/ES2011-54496>.

## RESEARCH OF REGULATORY AND TECHNICAL FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF MOBILE POWER PLANTS WITH COMBINED STARTING SOURCE

- Kulagin D.O.** D.Sc. (Engineering), professor, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3610-4250>, e-mail: [kulagindo@gmail.com](mailto:kulagindo@gmail.com);
- Maslov I.Z.** PhD (Engineering), associate professor, Danube Institute of the National University «Odesa Maritime Academy», Izmail, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1759-6077>, e-mail: [maslovigor@i.ua](mailto:maslovigor@i.ua);
- Dievochkin V.F.** postgraduate student, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2381-5245>, e-mail: [vdev@zp.edu.ua](mailto:vdev@zp.edu.ua)

The paper considers the scientific and practical aspects of building power supply systems for mobile power plants with combined starting sources under variable loads and adverse temperature factors. The relevance of the study is due to the need to increase the reliability of starter start of diesel generator sets, reduce energy losses and improve the operational characteristics of transport equipment. The purpose of the paper is to scientifically substantiate and develop a methodology for designing energy-efficient electric starter start systems based on combined power sources. To achieve the set goal, a set of tasks related to the analysis of existing technical solutions, the development of mathematical models of energy processes, the study of transient regimes and the justification of the choice of energy storage devices was solved. The research process used methods of system analysis, mathematical modeling, technical and economic assessment and structural decomposition of energy systems. Particular attention is paid to the analysis of the interaction of batteries and capacitive energy storage devices, optimization of the distribution of power flows and minimization of losses in the processes of generation, transmission and consumption of electricity. The features of the construction of combined starting systems are considered, including the topology of electrical networks, control algorithms and regulatory and technical requirements for their operation. The generalized results of the study indicate that the use of combined power sources provides an increase in the efficiency of starting processes, a reduction in the duration of starting and a reduction in specific fuel consumption up to 8.5%. Approaches to optimizing the structure of the power system are proposed, which allow increasing its reliability and energy efficiency through rational management of energy flows and reactive power compensation. The conclusions substantiate the scientific novelty, which consists in the formation of a comprehensive methodology for designing combined electric starter starting systems taking into account dynamic operating modes and regulatory restrictions. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the results obtained in the design and modernization of mobile power plants. Promising directions for further research have been identified, related to improving control algorithms, expanding the functionality of energy storage devices, and increasing the overall efficiency of transport energy systems.

**Keywords:** power supply; power plant; supercapacitors; energy efficiency; energy losses; mathematical modeling; diesel generator; electrical machines and devices.

### References

- [1] D. Kulagin, and I. Maslov, "Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor," in *Proc. of the 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, October 07–11, 2024, pp. 1–5. doi: **10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991**.
- [2] D. Kulagin, and I. Maslov, "Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 8(138), pp. 24–35, 2025. doi: **10.15587/1729-4061.2025.345066**.
- [3] D. Kulagin, and I. Maslov, "Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant," *Problemele Energeticii Regionale*, no. 4, pp. 18–31, 2025. doi: **10.52254/1857-0070.2025.4-68.02**.
- [4] Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007. doi: **10.1109/JPROC.2006.892482**.
- [5] Z. Chen, H. Wang, and Y. Yan, "A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3588–3595, 2012. doi: **10.1109/TIE.2011.2159951**.
- [6] C. C. Chan, K. T. Chau, J. Z. Jiang, W. Xia, M. Zhu, and R. Zhang, "Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 331–339, 1996. doi: **10.1109/41.491357**.

- [7] W. Cai, "Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications," in *Proc. of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting*, Seattle, WA, USA, October 03-07, 2004, article 393. doi: **10.1109/IAS.2004.1348437**.
- [8] C. Liu, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4055–4064, 2010. doi: **10.1109/TIE.2010.2044128**.
- [9] J. W. Finch, and D. Giaouris, "Controlled AC Electrical Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 481–491, 2008. doi: **10.1109/TIE.2007.911209**.
- [10] K. T. Chau, and C. C. Chan, "Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 821–835, 2007. doi: **10.1109/JPROC.2006.890114**.
- [11] M. Ehsani, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 19–27, 1997. doi: **10.1109/41.557495**.
- [12] J. M. Miller, A. R. Gale, P. J. McCleer, F. Leonardi, and J. H. Lang, "Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis, MO, USA, October 12-15, 1998, vol. 1, pp. 513–523. doi: **10.1109/IAS.1998.732360**.
- [13] F. H. Khan, L. M. Tolbert, and W. E. Webb, "Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multi-level Modular Capacitor-Clamped Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3079–3095, 2009. doi: **10.1109/TIE.2009.2022074**.
- [14] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund, and W. D. Jones, "Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 553–561, 1995. doi: **10.1109/28.382116**.
- [15] C. C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002. doi: **10.1109/5.989873**.
- [16] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy Storage Systems for Automotive Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258–2267, 2008. doi: **10.1109/TIE.2008.918390**.
- [17] Industrial Diesel Engines 3516. [Online]. Available at: [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html). Accessed on: June 29, 2025.
- [18] N. C. Macari, and R. D. Richardson, "Operation of a Caterpillar 3516 Spark-Ignited Engine on Low-Btu Fuel," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 109, no. 4, pp. 443–447, 1987. doi: **10.1115/1.3240061**.
- [19] H. Lam, M. Richter, and G. Ashton, "A New Approach to Maximize the Potential of Reciprocating Engines Operating on Bio-Fuel Energy," in *Proc. of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, USA, August 7–10, 2011, paper no: es2011-54496, pp. 1149–1158. doi: **10.1115/ES2011-54496**.

Стаття надійшла 23.01.2026

Стаття прийнята 15.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Кулагін Д. О., Маслов І. З., Девочкін В. Ф. Дослідження нормативно-технічних особливостей побудови систем електропостачання мобільних енергоустановок з комбінованим пусковим джерелом. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359883>.