

**Kletska O.V., Ivanchenko D.A., Falendysh A.P.,
Vasylnichenko O.S., Shykalovskyi D.G.**

METHOD OF DETERMINING A VEHICLE FOR CARRYING A GIVEN NUMBER OF PASSENGERS

The paper considers the issue of defining a vehicle for passenger transportation. Passenger transportation in modern conditions of Ukraine depends on many factors and risks. One of the ways to increase the efficiency of passenger transportation is the correct and rational choice of a vehicle for transporting passengers, which depends on many factors, the main ones of which include their number, transportation distance, comfort conditions, etc. An analysis of approaches to the selection of ground vehicles is performed. A methodology for selecting a vehicle for transporting a given number of passengers is proposed. It consists of three components. First, an approach is proposed for determining the type of transport for transportation, which is based on the use of the analysis of hierarchies method and consists of three levels. At the first level, the purpose of the calculations is formulated. At the second level, indicators that characterize the vehicle during transportation are selected by expert method and a matrix of comparisons of types of transport is developed according to these indicators. At the third level, the coefficients of the selection criteria for each type of transport are calculated. At the second stage, a methodology for selecting a specific vehicle for the selected type of transport is proposed. The paper presents the choice of a motor vehicle for transporting passengers. To solve this component of the methodology, the method of hierarchy analysis or methods for assessing the technical level of vehicles was used. The final operation is the selection of the number of transport vehicles to meet the specified passenger transportation. Based on the developed methodology, calculations were made to select the type and number of vehicles for transporting ten small groups of passengers abroad. The proposed methodology for selecting a vehicle for transporting passengers allows you to determine the type of transport and the series and technical characteristics of vehicles, taking into account their technical condition at the enterprise at the time of calculations.

Keywords: road transport, passenger transportation, bus, international transportation, hierarchy analysis method, technical level.

Стаття надійшла 03.03.2026р.

Стаття прийнята 06.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

275 – Транспортні технології

УДК 621.311.6:621.316.717:34.01/.09

doi.org/10.31498/2522-9990312026359374

Кулагін Д.О., Маслов І.З., Дєвочкін В.Ф.

НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

У роботі розглянуто актуальні питання підвищення енергоефективності та надійності мобільних енергетичних установок на основі дизель-генераторних агрегатів. Автор аналізує сучасні транспортні засоби як складні багатокомпонентні системи, де механічні, електромагнітні та термодинамічні процеси перебувають у нерозривному взаємозв'язку.

Особливу увагу приділено дослідженню взаємного впливу елементів електромеханічного ланцюга в умовах змінних навантажень, що є характерним для автономних мобільних платформ. У ході дослідження обґрунтовано переваги переходу до інверторних систем з ланкою постійного струму, які дозволяють реалізувати режим змінних обертів дизельного двигуна. Такий підхід забезпечує роботу первинного привода в зоні мінімальної питомої витрати палива, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат на 40% та зменшенню шкідливих викидів на чверть. На основі аналізу функцій ККД підсистеми редуктор-рушій доведено доцільність використання багатоступінчастих трансмісій, впровадження яких дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії на 4% за рахунок оптимізації витрат на тертя. Окремий акцент зроблено на питаннях електромагнітної сумісності та конструктивної міцності генераторних вузлів. Визначено умови максимізації ККД електричних машин через раціональний розподіл постійних і змінних витрат, а також запропоновано схеми паралельного підключення перетворювачів зі спільним керуванням для стабілізації вихідних параметрів енергії. Результати роботи створюють наукове підґрунтя для побудови адаптивних систем керування, що інтегрують методи математичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації для гарантування стабільної роботи транспортних засобів в екстремальних експлуатаційних режимах.

Ключові слова: система електропостачання, електричні машина та апарати, математичне моделювання, транспорт, енергетика, джерело живлення, електропривод, енергетичне законодавство.

Постановка проблеми. Сучасні транспортні засоби, в основі яких лежать дизель-генераторні енергетичні установки, слід розглядати не просто як автономні одиниці, а як складні багатокомпонентні системи [1]. Вони являють собою динамічне поєднання енергетичних джерел, теплообмінних апаратів, розгалужених мереж трубопроводів та механічних вузлів, які працюють у єдиному технологічному циклі. Головне завдання такої інтеграції полягає не лише у забезпеченні тягових характеристик для руху, а й у безперебійному живленні численних допоміжних систем та внутрішніх процесів [1, 2]. Саме тому в загальній номенклатурі транспортних засобів техніка з дизель-генераторним приводом займає одну з ключових позицій, залишаючись базовим рішенням для багатьох галузей економіки [3].

Аналіз наявних наукових досліджень підкреслює незмінний інтерес фахівців до вивчення експлуатаційних параметрів такої техніки. Наукова спільнота зосереджує увагу на пошуку кореляцій між технічними характеристиками окремих вузлів та загальною продуктивністю всієї установки [4]. Це дозволяє встановити фундаментальні кількісні та якісні показники, які безпосередньо впливають на ефективність роботи. Розуміння цих залежностей є критично важливим для прогнозування поведінки системи в різних режимах навантаження та для оптимізації її функціональних можливостей ще на етапі проектування або модернізації.

Питання надійності функціонування дизель-генераторних установок на транспорті нерозривно пов'язане з цілим комплексом факторів, що діють одночасно. Сюди належить технічний стан обладнання, специфіка зовнішніх умов експлуатації, фізико-хімічні властивості використовуваного палива, а також загальна кількість та потужність енергоспоживачів на борту [3, 5]. Нехтування будь-яким із цих аспектів може призвести до стрімкого зростання операційних витрат, які часто додають до вартості палива до 80% непередбачуваних витрат. Оскільки кожен споживач електричної енергії розрахований на роботу в межах чітко визначених значень напруги, сили струму та номінальної частоти,

забезпечення високої якості електроенергії стає базовою вимогою для підтримання справності всього обладнання та запобігання передчасним відмовам [6].

В умовах сьогоденної економічної нестабільності, коли ціни на енергоносії стабільно зростають щонайменше на 15–20% щороку, проблема енергоефективності стає надзвичайно гострою [7]. Пошук шляхів для ощадливого використання ресурсів є вимогою часу, проте цей процес має бути виваженим. Будь-яке впровадження технологій економії або зменшення споживання палива не повинно відбуватися за рахунок зниження експлуатаційної безпеки чи виходу за межі допустимих ризиків щодо надійності транспортної енергоустановки. Таким чином, сучасна інженерна думка спрямована на створення таких алгоритмів керування, які дозволяють досягти максимальної економії без втрати робочого ресурсу системи.

Проблема дослідження особливостей взаємного впливу елементів електромеханічної системи мобільної енергетичної установки з автономним джерелом енергії є критично важливою через складність перехідних процесів, що виникають у замкненому енергетичному контурі. На відміну від стаціонарних систем, мобільні установки працюють у режимах постійної зміни навантаження, що провокує виникнення зворотних зв'язків між дизельним двигуном, генератором та системою перетворювальної техніки [2, 8]. Електромагнітні процеси в генераторному вузлі безпосередньо впливають на термодинамічні показники двигуна внутрішнього згоряння, викликаючи нерівномірність крутного моменту та зміну питомої витрати палива. Водночас динаміка споживачів енергії через силову електроніку створює гармонійні спотворення, які негативно позначаються на ресурсі ізоляції та загальній надійності системи [4, 9]. Розуміння цих взаємозалежностей дозволяє відійти від проектування окремих вузлів до створення інтегрованої інтелектуальної системи, де кожен елемент адаптується до стану іншого. Це не просто питання технічної сумісності, а фундаментальна основа для досягнення максимального ККД та стабільності роботи транспортного засобу в умовах екстремальних експлуатаційних навантажень, що в кінцевому підсумку визначає економічну життєздатність усієї мобільної платформи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гарантування безперервної роботи транспортних енергоустановок неможливе без впровадження інтелектуальних систем діагностування та постійного контролю технічних параметрів безпосередньо в процесі експлуатації [7, 10]. Сучасний підхід до вирішення цих завдань полягає у проектуванні принципово нових конструкцій агрегатів та джерел енергії, які б відповідали жорстким вимогам надійності [11]. Інженерна думка сьогодні зосереджена на переході від реактивного обслуговування (ремонт за фактом поломки) до проактивних стратегій, що базуються на глибокому аналізі стану об'єкта в реальному часі [9, 12].

Важливим кроком у модернізації транспортного сектору є інтеграція новітніх дизельних агрегатів у поєднанні з сучасною напівпровідниковою перетворювальною технікою [12]. Оновлення елементної бази дозволяє не лише розширити функціонал систем управління, а й впровадити алгоритми прогнозування несправностей ще до їх критичного прояву. Практичні переваги такого підходу є очевидними: використання передової перетворювальної техніки дає змогу скоротити експлуатаційні витрати майже на сорок відсотків, одночасно знижуючи рівень шумового забруднення та спрощуючи процедури сервісного обслуговування [6, 13]. Крім того, екологічний аспект такої модернізації дозволяє зменшити обсяг шкідливих викидів у повітря на чверть, що є критично важливим для сучасних стандартів безпеки [14].

Центральною проблемою транспортної галузі залишається висока енергоємність процесів, тому підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних установок стає пріоритетним вектором досліджень. Вирішення цієї задачі вимагає комплексного підходу, який включає розробку оптимізованих конструкцій двигунів, створення високоефективних електричних мереж та впровадження унікальних алгоритмів цифрового керування елементами

установки [15]. Лише за умови гармонійного поєднання механічної досконалості двигуна з інтелектуальним керуванням електричною частиною можна досягти реального зниження витрат палива [16].

Постійне здорожчання дизельного пального та інших енергоресурсів ставить перед науковцями виклик: як максимально використати наявний енергетичний потенціал транспортних засобів, який наразі залишається недовикористаним [17]. В основі цієї науково-прикладної проблеми лежить необхідність подолання технічних бар'єрів, що заважають реалізації високого ККД при збереженні експлуатаційної стійкості. З огляду на стратегічне значення водного та залізничного транспорту, підвищення енергоефективності цих секторів дозволить значно знизити їхню залежність від коливань світового ринку ресурсів та інших зовнішніх дестабілізуючих факторів [10, 18].

Варто розуміти, що проблема зниження енергетичних витрат на транспорті є багатогранною та комплексною за своєю природою. Вона не може бути вирішена точковими методами, оскільки вимагає синтезу фундаментальних досліджень та практичних інженерних рішень [19]. Створення єдиної системи, яка б об'єднувала методи підвищення енергоефективності з інструментами забезпечення надійності, є єдиним шляхом до побудови автономної та економічно стійкої транспортної інфраструктури, здатної ефективно функціонувати в умовах сучасних викликів [20].

Одним із найбільш перспективних векторів підвищення енергоефективності сучасних транспортних комплексів є перехід до інверторних автономних електричних систем. Основна концепція такого підходу полягає у відмові від жорсткої фіксації частоти обертання дизельного двигуна [8, 21]. В інверторних установках агрегат працює у режимі змінних обертів, а стабілізація вихідних параметрів напруги до стандартних значень здійснюється за допомогою силового напівпровідникового каскаду, що складається з випрямляча та перетворювача частоти. Ключовою перевагою такої архітектури є можливість автоматичної адаптації роботи дизеля до поточного електричного навантаження [22]. Це дозволяє системі постійно підтримувати оптимальну частоту обертання валу, орієнтуючись на критерій мінімальної питомої витрати палива, що дає суттєву економію порівняно з класичними установками загальнопромислового типу.

Окрім паливної економічності, автономні системи інверторного типу відкривають широкі можливості для побудови гібридних енергетичних комплексів. Завдяки використанню єдиної мережі постійного або регульованого змінного струму стає можливим просте інтегрування різнотипних джерел енергії, таких як установки відновлюваної енергетики або буферні накопичувачі [23-25]. Проте реалізація такого потенціалу потребує створення високоефективних пристроїв автоматичного регулювання. Розробка алгоритмів управління, що базуються на складних законах мінімізації витрат ресурсів, вимагає побудови всеосяжних математичних моделей. Такі моделі мають враховувати динаміку дизельного двигуна, характеристики синхронного генератора, режими роботи силових перетворювачів та специфіку поведінки автономного споживача [24-26].

Особливе місце у цьому процесі посідає математичне моделювання саме дизельного двигуна, оскільки воно дозволяє досліджувати як миттєві перехідні процеси, так і тривалі режими роботи всієї установки. Незважаючи на те, що питання електромагнітних процесів у транспортних машинах загалом висвітлені в науковій літературі, досі спостерігається певний дефіцит комплексних моделей, які б одночасно описували функціонування синхронного генератора та частотного перетворювача в межах єдиної транспортної системи. Існуючі імітаційні моделі часто фокусуються лише на залежності витрати палива від моменту на валу та положення паливної рейки, залишаючи поза увагою складні взаємодії в електричній частині системи [25, 27].

Паралельно з енергетичною оптимізацією гостро постає питання інтелектуального діагностування обладнання. Традиційні логічні та алгебраїчні алгоритми, засновані на пошуку мінімальних функцій або маніпуляціях з матрицями суміжності, демонструють свою обмеженість при роботі зі складними транспортними об'єктами. Висока взаємопов'язаність функціональних параметрів та значна потужність графів станів роблять такі підходи надто громіздкими або неточними [28, 29]. Навіть використання евристичних методів із перенумерацією вершин часто призводить до надмірної кількості переборів та неоднозначності результатів, не даючи чіткого обґрунтування для вибору єдиного оптимального рішення [30].

Узагальнюючи наявний досвід, можна стверджувати, що найбільш перспективним шляхом вирішення цієї багатогранної проблеми є застосування багатокритеріальних методів прийняття рішень. Зокрема, метод покриття таблиць відстаней дозволяє більш глибоко проаналізувати та оптимізувати складні процеси в енергоустановках, долаючи недоліки попередніх алгоритмів. Саме такий системний підхід, що поєднує в собі точне математичне моделювання силових агрегатів та сучасні методи прийняття рішень, створює підґрунтя для реального підвищення енергоефективності та надійності мобільних енергетичних систем.

Постановка завдання. Функціонування мобільних енергетичних установок визначається складними перехідними процесами, що виникають у замкненому контурі між первинним двигуном, синхронним генератором та силовою перетворювальною технікою. Ключовою науковою проблемою на сьогодні залишається дефіцит системних досліджень саме взаємного впливу цих елементів, коли зміна робочого стану одного вузла викликає ланцюгову реакцію в усьому електромеханічному ланцюзі. Зокрема, виникає необхідність розв'язання фундаментальної суперечності між високодинамічними режимами споживання енергії та механічною інерційністю агрегатів, що потребує детального вивчення зворотного зв'язку електромагнітних процесів генератора та їхнього впливу на механічні характеристики привода.

Важливим етапом дослідження є математичне моделювання взаємодії між генератором та перетворювачем частоти з урахуванням нелінійності напівпровідникових елементів. Це дозволяє встановити межі стійкості системи при різких змінах параметрів керування інвертором та оцінити вплив якості електроенергії на виникнення додаткових втрат у залізі й обмотках електричної машини, що часто призводить до локальних перегрівів та прискореної деградації ізоляції.

Сформульовані умови мають забезпечити такий режим роботи, за якого взаємний негативний вплив елементів буде мінімізовано, що гарантуватиме максимальну енергетичну віддачу та безаварійність мобільної платформи. Вирішення цих питань дозволить створити цілісну фізико-математичну картину процесів, необхідну для побудови систем адаптивного керування енергоблоками в екстремальних умовах експлуатації.

Мета досліджень. Дослідження особливостей взаємного впливу елементів електромеханічної системи мобільної енергетичної установки з автономним джерелом електроживлення.

Основний матеріал дослідження. При сталому моменті тертя функція ККД для редуктора матиме вигляд, показаний на рис. 1.

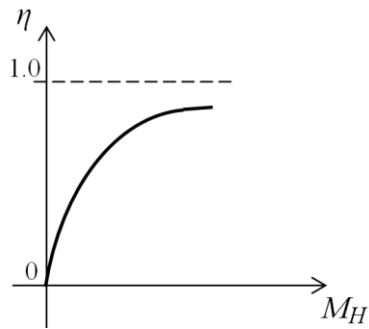


Рисунок 1 – Функція ККД від моменту навантаження транспортного редуктора

Виконаємо побудову залежності ККД редуктора за умови змінного моменту тертя (рис. 2.).

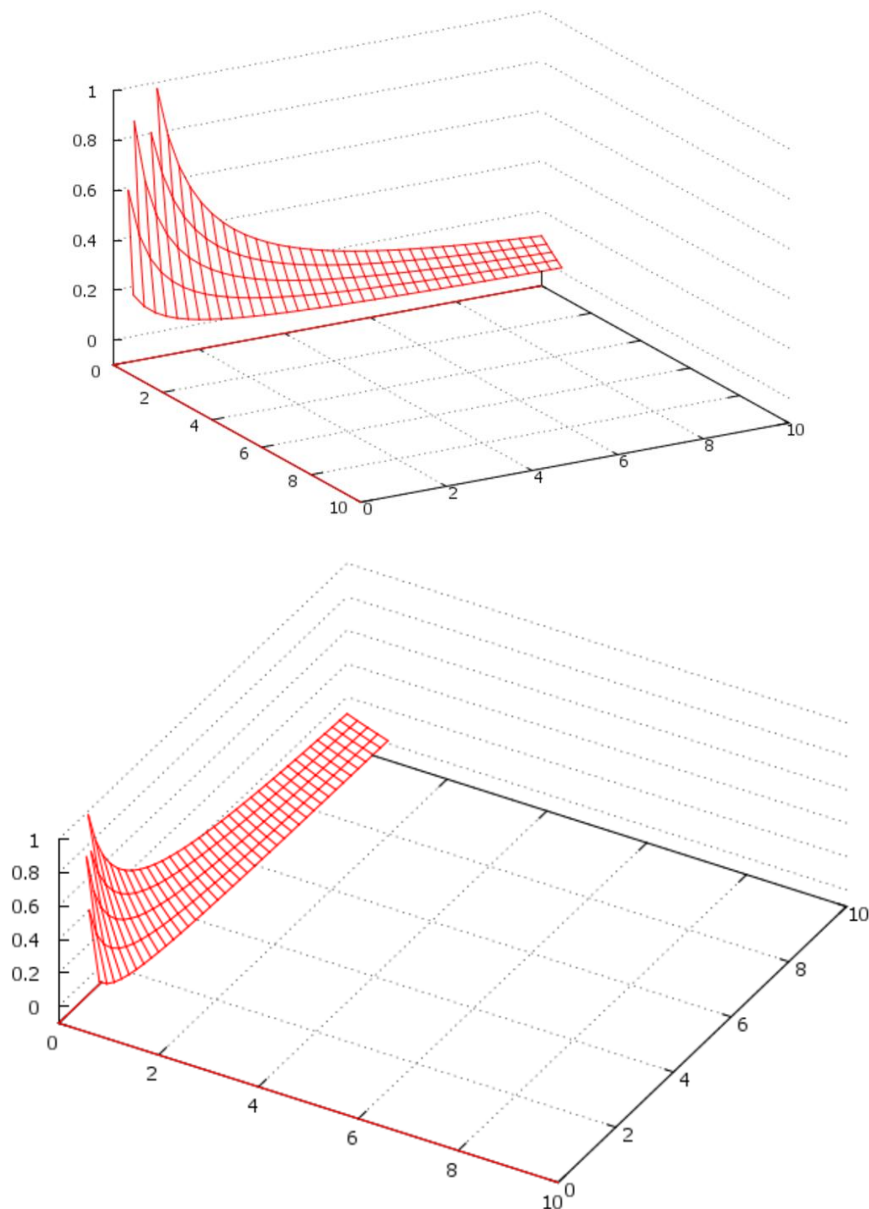


Рисунок 2 – Функція ККД (вісь аплікат у в.о.) від моменту навантаження (вісь абсцис у в.о.) та моменту тертя (вісь ординат у в.о.)

Аналіз графіків на рис. 1 та 2 свідчить, що зі зростанням навантажувального моменту ККД підсистеми двигун–редуктор–рушій також підвищується, поступово наближаючись до свого максимального значення. Таким чином, найвищий ККД підсистеми редуктор–рушій досягається при оптимальному рівні механічної потужності на вихідному валу, який відповідає характеристикам конкретного редуктора.

Залежність ККД підсистеми редуктор-рушій в залежності від кількості ступенів редуктора показано на рис. 3 виходячи з принципу ККД послідовно з'єднаних ланок.

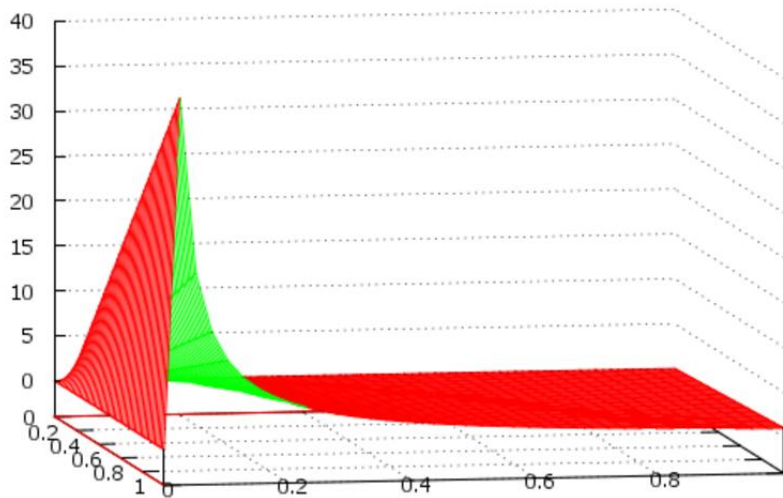


Рисунок 3 – Функція коефіцієнта втрат на тертя (відсоткового – вісь апікат) від моменту навантаження (вісь абсцис у в.о.) та моменту приводного двигуна (вісь ординат у в.о.)

На основі аналізу рис. 3 приходимо до висновку, що найбільш раціональним є використання багатоступінчатого редуктора, передаточне число якого можна змінювати в залежності від навантаження системи. Відповідно до рис. 4 такий підхід (на прикладі 4 ступенів редуктора) дозволяє збільшити ККД на 4%. При цьому значення коефіцієнта втрат на тертя змінюється як показано на рис. 4.

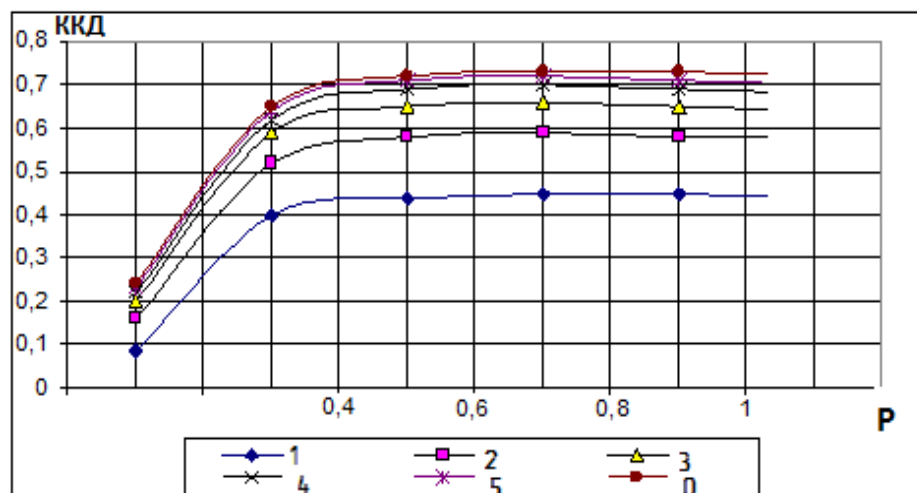


Рисунок 4 – Залежність ККД підсистеми редуктор-рушій в залежності від кількості ступенів редуктора

Збільшення потужності перетворювачів з автономними інверторами напруги здійснюється шляхом послідовного з'єднання ключів або паралельного включення перетворювачів. Через відмінності зовнішніх характеристик вирівнювання струмів здійснюється за допомогою регуляторів струму, як це показано на структурній схемі рис. 5.

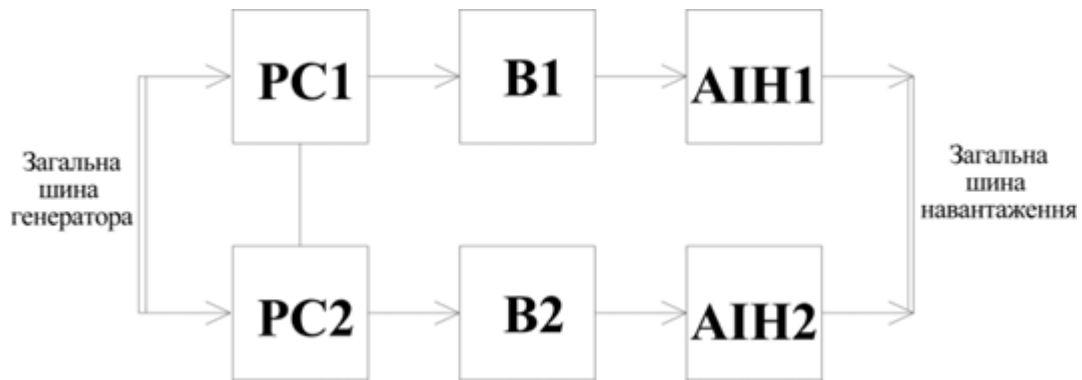


Рисунок 5 – Структурна схема паралельного підключення перетворювачів частоти з регуляторами струму

Дана схема є вельми ефективною при наявності гальванічної розв'язки з боку живлення, або навантаження. При відсутності гальванічної розв'язки дана схема практично не придатна через наявність внутрішніх зрівнювальних контурів. Для виключення появи таких контурів перетворювачі керуються однією системою, яка одночасно формує імпульси керування на відповідні ключі, що показано на рис. 6.

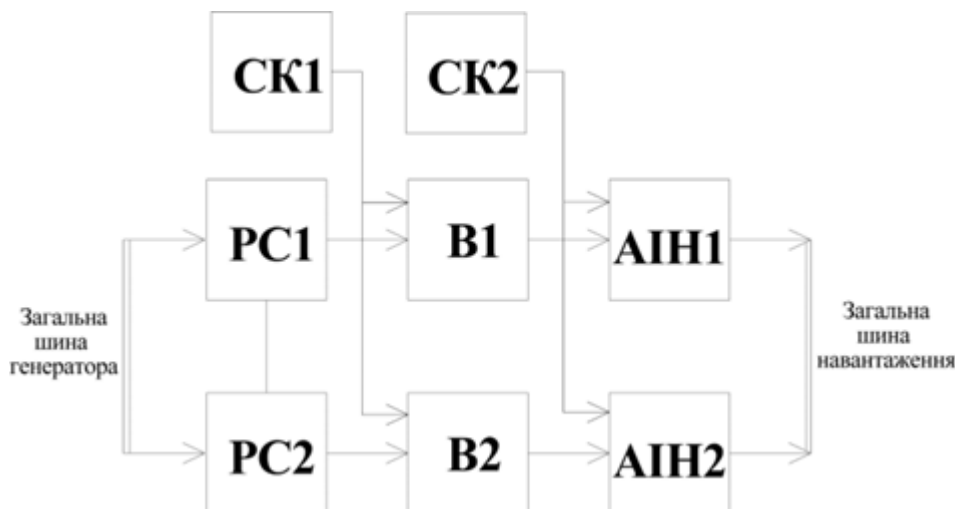


Рисунок 6 – Структурна схема паралельного підключення перетворювачів частоти зі спільними системами регулювання

В даному випадку нерівність струмів, які протікають по перетворювачам, визначається розкидом внутрішніх параметрів елементів схеми і носить сталий характер. Дещо збільшене навантаження перетворювачів з меншим внутрішнім опором є несуттєвим недоліком схеми, який виправдовується порівняно простою системою керування.

У разі змінювання навантаження асинхронного двигуна окремі види втрат змінюються по-різному: електричні втрати P_{el} в обмотках статора і ротора, а також додаткові втрати P_0

змінюються пропорційно квадрату струму навантаження. Інші види втрат – механічні $P_{\text{мех}}$ і магнітні $P_{\text{м}}$ – залишаються практично незмінними, тобто такими самими, як і у разі холостого ходу, якщо напруга машини U_1 і частота її обертання n_2 не змінюються. За цією ознакою всі види втрат поділяють на дві групи:

– постійні втрати $P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}}$

– змінні втрати $P_{\text{зм}} = P_{\text{ел}} + P_{\text{щ,ел}} + P_{\text{д}}$, тобто втрати, що змінюються приблизно пропорційно квадрату струму навантаження.

Потужність P_2 ($P_2 = P_{\text{мех}}$ – в двигунах) пропорційна струму навантаження I в першому ступені. Отже, залежність ККД машини від струму навантаження можна виразити у вигляді:

$$\eta(I) = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{\text{пост}} + P_{\text{зм}})} = \frac{AI}{(AI + B + CI^2)}, \quad (1)$$

де A, B, C – сталі значення.

Зі збільшенням струму навантаження ККД двигуна зростає за рахунок збільшення потужності P_2 , але водночас швидше, ніж P_2 , зростають і змінні втрати $P_{\text{ем}}$. Тому, після досягнення струмом певного значення $I_{\text{кр}}$, зростання ККД припиняється, і надалі він починає зменшуватись.

Взявши похідну $\frac{d\eta}{dI}$ і прирівнявши її до нуля, можна отримати умову

максимуму ККД: η приймає максимальне значення за такого навантаження, коли $P_{\text{ем}} = P_{\text{пост}}$. Тому під час вибору двигуна для транспортної системи слід розподілити втрати потужності таким чином, щоб умова $P_{\text{ем}} = P_{\text{пост}}$ виконувалась у разі найбільш ймовірного навантаження машини, трохи меншого за номінальне навантаження. В машинах середньої і великої потужності ця умова виконується тоді, коли навантаження становить (60 ÷ 85) % номінального. У цьому разі в діапазоні навантажень (0,6 ÷ 1,0) номінального навантаження ККД залишається приблизно однаковим.

Розглянемо основні варіанти реалізації загальної шини постійного струму, використовуючи дослідження.

Для засобів транспорту із передачею змінного струму найбільш доцільним рішенням є використання синхронного генератора. У разі застосування на засобах транспорту малої потужності можливе використання генератора постійного струму. Хоча експлуатаційні умови для такого генератора загалом сприятливіші, ніж для тягових електродвигунів, наявність колектора є суттєвим недоліком, що обмежує його використання лише окремими випадками при невеликих потужностях.

Перший тип системи передачі змінного струму (рис. 7) включає синхронний генератор та групу асинхронних короткозамкнених двигунів. Така схема має назву «прозора», оскільки обертальний момент асинхронних двигунів прямо пропорційний моменту, що створюється на валу синхронного генератора. Зміна частоти живильної напруги здійснюється переважно шляхом регулювання частоти обертання дизельного двигуна. Для точнішого регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів також змінюють кількість полюсів як синхронного генератора, так і асинхронного двигуна. У такій системі перетворювач не використовується, а регулювання напруги здійснюється за допомогою регулятора у колі збудження генератора.

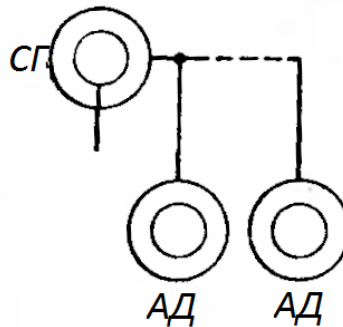


Рисунок 7 – Структурна схема побудови кола синхронний генератор-тяговий двигун без перетворювача частоти

Перевагою такої системи є її відносна конструктивна простота. Водночас вона має низку суттєвих недоліків: низьку точність налаштування координат, відсутність спільної шини постійного струму, а також необхідність роботи синхронних генераторів у швидкозмінних режимах, що зумовлює значні енергетичні втрати та неефективну роботу теплового двигуна. Усе це обмежує застосування такої системи лише електромеханічними установками невеликої потужності.

Для виконання передачі рис. 8 використовується генератор постійного струму, автономний інвертор і асинхронний двигун і вона може називатися передачею постійного та змінного струму одночасно.

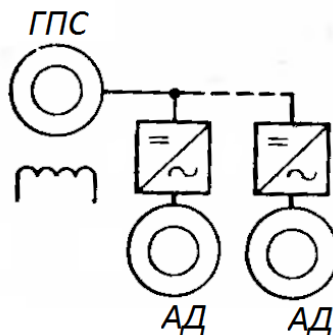


Рисунок 8 – Структурна схема передачі з індивідуальним перетворювачем

Незалежно від частоти обертання валу генератора, інвертор змінює частоту напруги статора двигуна. Як і у всіх інших варіантах, в ланцюзі збудження генератора передбачений регулятор. Кожен інвертор у системі має власну систему керування. Окрім цього, регулятори частоти мають бути індивідуально передбачені для кожного електродвигуна або для групи двигунів. Двигуни можуть підключатися як до окремих інверторів, так і паралельно до спільної шини постійного струму.

Серед переваг такої конструкції – висока точність налаштування координат електроприводу та робота генератора у майже сталому режимі, що сприяє підвищенню енергоефективності. Водночас існують і недоліки: відсутність єдиної шини постійного струму для всього засобу транспорту (напруга в ланках випрямлячів може відрізнятись), а також наявність рухомих контактів у генераторах. Ці особливості зумовлюють доцільність використання даної схеми в електромеханічних системах середньої потужності.

Система, зображена на рис. 9, відрізняється від попередньої тим, що генератор постійного струму замінено синхронним генератором та випрямлячем, який може бути як некерованим, так і керованим. Кожен інвертор у цій схемі використовується окремо або, зазвичай, є спільним для всіх інверторів.

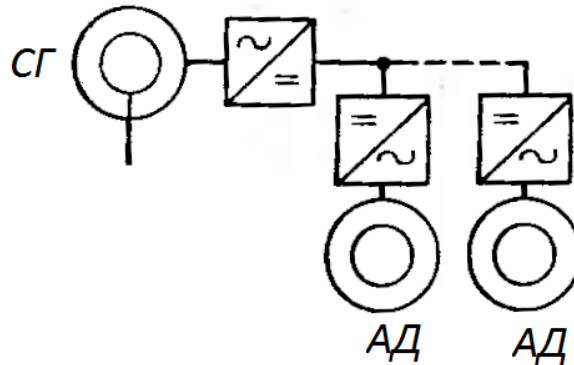


Рисунок 9 – Структурна схема передачі з індивідуальним автономним інвертором напруги та загальним випрямлячем

Якщо випрямляч є керованим, до системи додається система керування, яка або інтегрується з системою керування синхронним генератором чи інвертором, або передбачає окремий регулятор. Усі ці компоненти разом утворюють систему передачі АС-DC-АС.

Перевагами такої конструкції є точне регулювання координат електроприводу, генератор працює практично в постійному робочому режимі, відсутність рухомих контактів в колі. Все це обумовлює використання даної системи в електромеханічних системах середньої та великої потужності.

У системі рис. 10, показано використання прямого перетворювача частоти замість перетворювача з ланкою постійного струму.

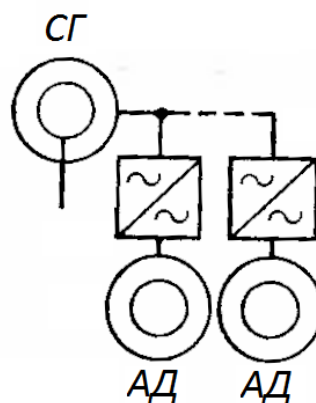


Рисунок 10 – Структурна схема передачі з безпосередніми перетворювачами частоти

У цьому типі перетворювача процес випрямлення напруги відбувається на заданій генератором частоті. Система управління такого типу перетворювача набагато складніша, ніж у інвертора. Цю систему іноді називають передачею АС-АС. Перевагою такої системи є вища ефективність. Однак суттєвим недоліком є відсутність можливості побудови загальної шини постійного струму, що обмежує її застосування лише на засобах транспорту малої потужності. В таких випадках система потребує живлення від окремого генератора.

Проаналізуємо основне розрахункове рівняння синхронної машини:

$$S = \frac{60^2 \cdot v^3}{\pi \cdot n^2} \cdot \lambda \cdot \alpha_i \cdot k_o \cdot k_B \cdot A \cdot B_\delta, \quad (2)$$

де v – окружна швидкість ротора;

n – частота обертання вала дизеля;

λ – відносна довжина;

k_o, k_B – коефіцієнти полюсного перекриття, обмотки, форми ЕРС;

A – лінійне навантаження,

B_δ – максимальне значення магнітної індукції в зазорі.

На рис. 11 покажемо залежність потужності генератора від окружної швидкості ротора та частоти обертання вала дизеля.

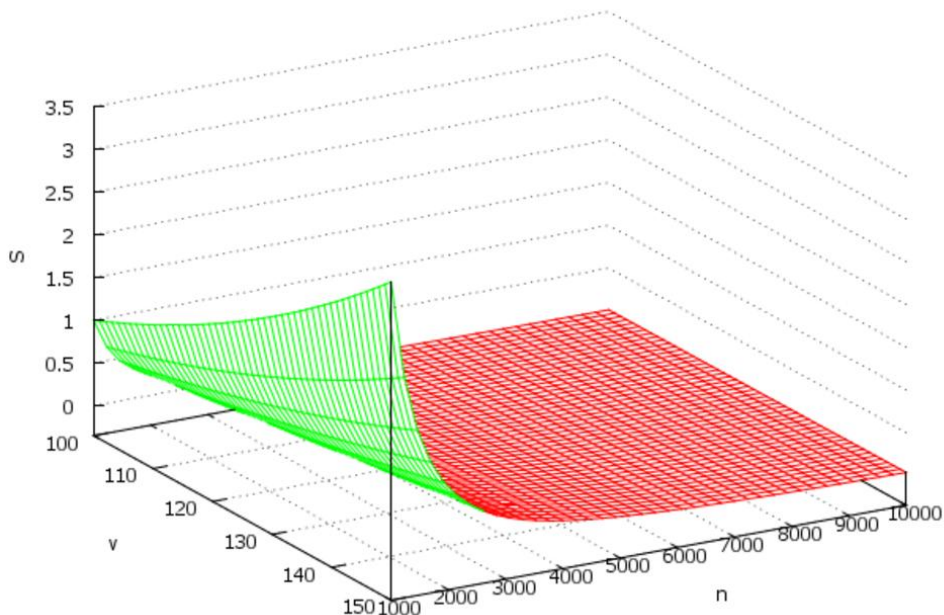


Рисунок 11 – Залежність потужності генератора від окружної швидкості ротора та частоти обертання вала дизеля

Приходимо до висновку, що гранична потужність генератора заданої частоти обертання залежить від конструктивної схеми ротора, і вибір конструктивної схеми, що дозволяє підвищити v на 25%, веде до збільшення S в 1,95 рази.

До синхронних генераторів, що використовують підвищену частоту обертання, пред'являються вимоги високих електромагнітних навантажень і міцності конструкції, що є суперечливими. Специфіка роботи з підвищеними частотами обертання вимагає виключення механічного контакту обертових і нерухомих деталей і забезпечення механічної міцності роторів. Перша вимога може бути задоволена шляхом застосування безконтактних підшипникових опор, що накладає обмеження на масу роторів і зусилля одnobічного магнітного притягання. Для задоволення другої вимоги необхідний пошук і застосування раціональних конструктивних схем роторів.

Нормативне регулювання питань взаємного впливу елементів електромеханічних систем у складі мобільних енергоустановок є складним процесом, оскільки такі об'єкти знаходяться

на перетині кількох галузевих стандартів: машинобудування, електротехніки та транспортної безпеки. Особливість нормативного підходу полягає в тому, що більшість чинних стандартів зазвичай розглядають компоненти системи – дизельний двигун, синхронний генератор та перетворювач частоти – як окремі одиниці обладнання. Однак для мобільних установок з автономним джерелом живлення критично важливим є врахування саме їхньої системної взаємодії, що вимагає звернення до спеціалізованих регламентів щодо електромагнітної сумісності та механічної тривкості.

Згідно з міжнародними стандартами серії IEC 60034, що регламентують роботу обертових електричних машин, особлива увага приділяється допустимим рівням вібрації та гармонійних спотворень. Проте в контексті мобільних систем нормативи вимагають враховувати не лише власні характеристики генератора, а й вплив на нього нелінійного навантаження з боку напівпровідникових перетворювачів. Нормативні вимоги до якості електроенергії (наприклад, IEEE 519 або аналогічні державні стандарти) встановлюють жорсткі межі для коефіцієнта нелінійних спотворень напруги. Для автономних систем ці норми є ще суворішими, оскільки через обмежену потужність джерела будь-яке спотворення форми струму, викликане роботою інвертора, миттєво спричиняє появу зворотних завод, що впливають на систему збудження генератора та стабільність крутного моменту первинного двигуна.

Важливим аспектом нормативного забезпечення є регламентація механічної взаємодії в системі «вал двигуна – ротор генератора». Стандарти з вібраційної безпеки та технічної діагностики (серії ISO 10816) передбачають проведення розрахунків на крутильні коливання. У мобільних установках з інверторним керуванням частота обертання постійно змінюється, що підвищує ризик потрапляння системи в зону резонансу. Нормативні документи вимагають, щоб власні частоти електромеханічної системи не збігалися з робочими частотами в усьому діапазоні регулювання, враховуючи при цьому пульсації моменту, що генеруються електричною машиною під впливом перетворювача. Це змушує розробників проводити комплексну перевірку динамічної міцності, яка виходить за межі стандартних випробувань окремих агрегатів.

Крім того, сучасні нормативи у сфері екологічної безпеки та енергоефективності опосередковано впливають на вимоги до взаємодії елементів системи. Стандарти типу Tier або Stage для дизельних приводів вимагають точного дотримання паливних карт, що можливо лише за умови ідеальної синхронізації електричного навантаження та механічної відповіді двигуна. Отже, нормативна база поступово еволюціонує від простої перевірки параметрів окремих вузлів до вимог щодо сертифікації всієї енергетичної установки як єдиного функціонального модуля. Такий підхід дозволяє гарантувати, що взаємний вплив елементів не призведе до виходу параметрів викидів, шуму або надійності за встановлені межі під час інтенсивної експлуатації в автономному режимі.

ВИСНОВКИ

Сучасні мобільні енергоустановки на базі дизель-генераторів трансформувалися у складні багатокomпонентні системи, де кожна зміна в електричному ланцюзі миттєво відбивається на механічних характеристиках привода. Традиційне розділення проектування паливних систем та електричних мереж втрачає актуальність, оскільки електромагнітні процеси в генераторному вузлі через зворотні зв'язки безпосередньо впливають на термодинамічні показники двигуна. Це вимагає переходу до створення інтегрованих інтелектуальних платформ, де кожен елемент адаптується до стану суміжних вузлів у

реальному часі, забезпечуючи стабільність крутного моменту та мінімізацію питомої витрати палива.

Аналіз енергетичних характеристик підсистеми редуктор-рушій свідчить про пряму залежність ККД від моменту навантаження та моменту тертя. Найбільш раціональним рішенням для підвищення ефективності механічної трансмісії є впровадження багатоступінчастих редукторів із можливістю зміни передаточного числа залежно від режиму роботи. Розрахунки підтверджують, що використання чотирьох ступенів редукції дозволяє збільшити загальний ККД системи на 4%, одночасно знижуючи коефіцієнт втрат на тертя. Такі конструктивні заходи у поєднанні з роботою двигуна в зоні 60–85% від номінальної потужності забезпечують оптимальний розподіл постійних та змінних втрат енергії.

Найбільший потенціал для модернізації мають інверторні автономні системи, що дозволяють відмовитися від фіксації частоти обертання вала. Робота дизельного агрегату в режимі змінних обертів забезпечує його функціонування в точці максимальної паливної економічності, що разом із використанням сучасної напівпровідникової техніки знижує операційні витрати на 40% та рівень шкідливих викидів на чверть. При цьому для нарощування потужності найбільш доцільною є схема паралельного підключення перетворювачів зі спільною системою керування, яка мінімізує внутрішні зрівнювальні струми без ускладнення конструкції гальванічною розв'язкою.

Забезпечення надійності таких високодинамічних систем можливе лише через комплексний аналіз електромагнітної сумісності та стійкості валопроводів до крутильних коливань. Оскільки гранична потужність генератора суттєво залежить від окружної швидкості ротора, вибір раціональних конструктивних схем безконтактних опор дозволяє підвищити енергетичну віддачу майже вдвічі. Тільки гармонійне поєднання методів багатокритеріальної оптимізації, точного математичного моделювання та адаптивного цифрового керування дозволяє досягти максимальної енергоефективності без ризику передчасної деградації ресурсів мобільної платформи в екстремальних умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. *Kulagin D. O.* Mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation. *Technical Electrodynamics*. 2014. No. 6. P. 49–55.
2. *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. P. 4055–4064. doi: 10.1109/TIE.2010.2044128.
3. *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. P. 3588–3595. doi: 10.1109/TIE.2011.2159951.
4. *Fahimi B., Emadi A., Sepe R. B.* A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004. Vol. 19, no. 1. P. 116–124. doi: 10.1109/TEC.2003.822322.
5. The importance of environmental education for effective environmental management / *S. Yekimov et al.* *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 296. 08002. doi: 10.1051/e3sconf/202129608002.
6. *Maslov I., Tymoshchuk O., Kulagin D.* Determining the Causes of Major Energy Losses in a Ship's Unified AC power system. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3428, iss. 1. 020021. doi: 10.1063/1.510038611.

7. *Chau K. T., Chan C. C.* Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95, no. 4. P. 821–835. doi: 10.1109/JPROC.2006.890114.
8. Battery choice and management for new-generation electric vehicles / *A. Affanni et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52, no. 5. P. 1343–1349. doi: 10.1109/TIE.2005.855664.
9. *Kulagin D., Maslov I.* Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant. Problemele Energeticii Regionale. 2025. Issue 4. P. 18–31. doi: 10.52254/1857-0070.2025.4-68.02.
10. *Finch J. W., Giaouris D.* Controlled AC Electrical Drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 2. P. 481–491. doi: 10.1109/TIE.2007.911209.
11. *Kulagin D. O.* The mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation of magnetic circuits. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2014. No. 6. P. 103–110.
12. *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, 2004). 2004. P. 393. doi: 10.1109/IAS.2004.1348437.
13. *Nitsenko V. V., Kulahin D. O.* Research on effect of differential-phase protection of busbars system with voltage of 110-750 kv. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. No. 4. P. 72–79.
14. Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles / *C. C. Chan et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, no. 2. P. 331–339. doi: 10.1109/41.491357.
15. *Kulagin D., Maslov I.* Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes. EEJET. 2025. Vol. 6, no. 8 (138). P. 24–35. doi: 10.15587/1729-4061.2025.345066.
16. *Korobko B., Kivshyk A., Kulagin D.* Experimental Study of the Efficiency of the Differential Pump of Electromagnetic Action on the Basis of Mathematical Modeling of the Parameters of Its Operation. Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 181. Springer, Cham, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-85043-2_20.
17. Energy Storage Systems for Automotive Applications / *S. M. Lukic et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 6. P. 2258–2267. doi: 10.1109/TIE.2008.918390.
18. 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, 1998). 1998. Vol. 1. P. 513–523. doi: 10.1109/IAS.1998.732360.
19. *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. P. 19–27. doi: 10.1109/41.557495.
20. *Nitsenko V., Kulagin D.* Improvement of methods for implementing relay protection of busbar systems in distribution installations. Technical Electrodynamics. 2017. No. 6. P. 61. doi: 10.15407/techned2017.06.061.
21. *Kulahin D. O.* Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve of motion. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2016. No. 2. P. 60–67.
22. *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. P. 3079–3095. doi: 10.1109/TIE.2009.2022074.

23. Using a phase-differential busbar protection for switchgears of power system facilities / D. O. Kulagin et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. No. 4. P. 63–67. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/10.

24. Analysis Of Current Approaches to Modernizing the Electric Power Scheme of Diesel Generator Transport / D. Kulagin et al. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312881.

25. Zhu Z. Q., Howe D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95, no. 4. P. 746–765. doi: 10.1109/JPROC.2006.892482.

26. Chan C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, no. 2. P. 247–275. doi: 10.1109/5.989873.

27. 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. P. 553–561. doi: 10.1109/28.382116.

28. 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). 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991.

29. Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages / R. W. Wies et al. IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20, no. 2. P. 692–700. doi: 10.1109/TPWRS.2005.846084.

30. Estimation of Optimization Approaches of the Energy Intensive Equipment's Power-Time Diagrams of Industrial Enterprises / K. Bratkovska et al. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 277–281. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969248.

Kulagin D.O., Maslov I.Z., Dievochkin V.F.

REGULATORY AND TECHNICAL ASPECTS OF ACCOUNTING FOR THE MUTUAL INFLUENCE OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM ELEMENTS IN MOBILE POWER UNITS WITH AUTONOMOUS POWER SOURCES

This paper addresses critical issues in enhancing the energy efficiency and reliability of mobile power units based on diesel-generator sets. The authors analyze modern vehicles as complex multi-component systems where mechanical, electromagnetic, and thermodynamic processes exist in an inseparable interconnection. Particular attention is devoted to investigating the mutual influence of electromechanical circuit elements under variable load conditions, which is characteristic of autonomous mobile platforms. The study substantiates the advantages of transitioning to inverter-based systems with a DC link, enabling the implementation of variable-speed operation for the diesel engine. This approach ensures that the primary prime mover operates within the zone of minimum specific fuel consumption, contributing to a 40% reduction in operating costs and a 25% decrease in harmful emissions. Based on an analysis of the efficiency functions of the "gearbox-propulsion" subsystem, the feasibility of using multi-stage transmissions is proven; their implementation allows for a 4% increase in overall efficiency through the optimization of friction losses. Specific emphasis is placed on electromagnetic compatibility and the structural integrity of generator units. Conditions for maximizing the efficiency of electrical machines through the rational distribution of constant and variable losses are determined, and parallel connection schemes for converters with common control

are proposed to stabilize output power parameters. The results of this work establish a scientific foundation for developing adaptive control systems that integrate mathematical modeling and multi-objective optimization methods to guarantee the stable operation of vehicles under extreme operational regimes.

Keywords: power supply system, electrical machines and apparatus, mathematical modeling, transport, power engineering, power source, electric drive, energy legislation.

Стаття надійшла 23.03.2026р.

Стаття прийнята 25.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

275 – Транспортні технології

УДК 656.19: 656.084

doi.org/10.31498/2522-9990312026359376

Молоштан Д. В., Загорянський В. Г.

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ДОРОЖНЬОГО РУХУ ПРИ НАЇЗДІ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ НА ВОДІЯ ЕЛЕКТРОСАМОКАТА

У роботі розглянуто проблему моделювання аварійних ситуацій дорожнього руху за участю легкових автомобілів та водіїв електросамокатів – категорії учасників, правовий статус якої в Україні досі не врегульований. Незважаючи на швидке зростання популярності електросамокатів, нормативна база щодо їх експлуатації залишається неповною, що ускладнює формування правил безпеки та проведення експертних досліджень ДТП. Аналіз статистичних даних показує, що значну частку аварій із залученням електросамокатів становлять наїзди легкових автомобілів. Метою роботи є аналіз діапазону габаритних розмірів і швидко-силових характеристик основних типів електросамокатів, що обумовлені особливостями їх компоновки, та розробка наближеної математичної моделі наїзду легкового автомобіля на водія електросамоката, навести діапазони значень для відомих параметрів моделі та визначити ті, які потребують оцінки. У контексті відсутності спеціалізованих методик експертизи ДТП даного типу запропоновано використовувати моделі, розроблені для наїздів на велосипедистів, як найбільш близькі за кінематичними та конструктивними характеристиками. У роботі проведено огляд сучасних електросамокатів за їх габаритними, конструктивними та швидко-силовими параметрами, що дозволило визначити їх типові діапазони маси, розмірів, потужності, швидкості та ефективності гальмування. Розглянуті особливості основних типів електроприводів, акумуляторів, коліс та гальмівних систем, які істотно впливають на поведінку електросамоката в екстрених ситуаціях. На основі узагальнення відомих залежностей запропоновано наближену математичну модель гальмування електросамоката та умови уникнення зіткнення під час поперечного або поздовжнього наїзду автомобіля. Визначено параметри моделі, які можуть бути отримані за аналогією з даними для велосипедів, а також ті, що потребують експериментальної оцінки. Результати роботи створюють методичне підґрунтя для подальшого розвитку експертних підходів до аналізу ДТП за участю водіїв електросамокатів.

Ключові слова: електросамокати, габаритні розміри, швидко-силові характеристики, легковий автомобіль, дорожньо-транспортні пригоди, наїзд, моделювання.