

Міністерство освіти і науки України  
Державний університет інфраструктури та технологій

**Кулагін Дмитро Олександрович**



УДК 621.436:621.31:656

**«Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних  
енергетичних установок засобів транспорту»**

Спеціальність 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки»  
(14 – Електрична інженерія)

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» та на кафедрі експлуатації засобів транспорту на внутрішніх водних шляхах Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України

**Богом'я Володимир Іванович,**

професор кафедри експлуатації засобів транспорту на внутрішніх водних шляхах, Державний університет інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Варбанець Роман Анатолійович,**

завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації, Одеський національний морський університет Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор

**Павленко Максим Анатолійович,**

начальник кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба Міністерства оборони України;

доктор технічних наук, професор

**Прохоренко Андрій Олексійович,**

завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання, Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться «\_\_» грудня 2020 року о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01 у Державному університеті інфраструктури та технологій за адресою: вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інфраструктури та технологій за адресою: вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, та за електронною адресою в мережі Internet:

<https://duit.edu.ua/research-activities/specialized-scientific-councils/d-26-110-01/>.

Автореферат розісланий «\_\_» листопада 2020 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01



О. М. Коломієць

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Транспортні засоби займають провідне місце в задоволенні потреб виробничої сфери, військового та агропромислового комплексів у перевезеннях, розвитку зовнішньоекономічних зв'язків держави і є важливим фактором забезпечення сталого економічного розвитку даних галузей, від чого напряму залежить зростання валового національного продукту України.

Для розв'язання **практичної проблеми** зниження енергетичних витрат транспортної галузі важливою є задача підвищення енергетичної ефективності парку дизельних агрегатів, для вирішення якої досліджуються та створюються сучасні конструкції енергетичних установок та джерел енергії для них, зокрема проводиться встановлення електричних елементів енергоустановок на базі сучасної перетворювальної техніки, розробляються сучасні алгоритми управління рухом. Об'єктивними перевагами транспортних засобів з електричними трансмісіями є зменшення експлуатаційних витрат до 40%, зниження кількості шкідливих викидів до 25%, менший рівень шуму. Але питання підвищення вартості енергоресурсів визначає **науково-прикладну проблему** розвитку наукових основ зменшення енергоемності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту. В основі даної проблеми лежить недовикористання енергетичного потенціалу дизель-генераторних систем (робота поза можливими для даної транспортної одиниці межами максимального статичного та динамічного ККД та мінімального питомого рівня витрат палива), яке пов'язане з необхідністю підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту за усталеними та перехідними характеристиками, а також при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху, необхідністю вдосконалення систем керування та алгоритмів управління рухом.

Вирішення задачі підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в умовах складної ситуації на ринку енергетичних ресурсів України та надання пріоритетності розвитку транспортного комплексу України дозволяє забезпечити зростання незалежності вказаної галузі від цілої низки чинників, які мають значний вплив на основні показники роботи багатьох підприємств та суміжних сфер. Енергозбереження та раціональне використання енергії під час виконання технологічних процесів у всіх службах та господарствах транспорту є основним резервом розвитку та забезпечення стабільності багатьох суміжних галузей в найближчій перспективі. Вказана проблема носить комплексний, багатокритеріальний характер. Її вирішення вимагає дослідження цілої низки складних науково-практичних задач, поєднання їх рішень в єдину систему взаємопов'язаної методології, яка має поєднувати методи, принципи та підходи, методичні та алгоритмічні засоби розвитку наукових основ зменшення енергоемності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

Отже, науково-прикладна проблема дисертаційної роботи, яка напрямлена на зменшення енергоемності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором в рамках «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» при виконанні досліджень в якості провідного виконавця у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03715 «Енергоощадне керування експлуатаційними характеристиками та параметрами систем електричної тяги автономного електрорухомого складу» (номер держреєстрації 0115U002567), за темою ДБ № 01719 від 01 вересня 2009 року «Розробка методів оптимізації систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і ЕТУ» (номер держреєстрації 0109U007668), за темою ДБ № 03712 від 01 вересня 2012 року «Розробка заходів для підвищення ефективності експлуатації й проектування систем електропостачання та ЕТУ» (номер держреєстрації 0112U005347), за темою № 03715 від 01 вересня 2015 року «Оптимізація систем електропостачання та ЕТУ з метою енергозбереження та покращення експлуатаційних характеристик» (номер держреєстрації 0115U004673).

**Мета дослідження** – підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

**Завдання дослідження.** Для досягнення визначеної мети в роботі поставлені такі основні задачі:

1. Декомпозиція дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту і розробка та аналіз математичної моделі декомпозованої структури.
2. Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в усталених режимах роботи.
3. Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в перехідних режимах роботи.
4. Аналіз резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху.
5. Апробація методології підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

**Об'єктом дослідження** є енергетичні, електромеханічні та електромагнітні процеси перетворення енергії в дизель-генераторних енергетичних установках засобів транспорту і їх елементах.

**Предметом дослідження** є встановлення закономірностей між параметрами режимів роботи дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту та показниками енергетичної ефективності з урахуванням узгодження та оптимізації процесів взаємодії компонентів у енергетичних установках.

**Наукова гіпотеза дослідження** полягає у припущенні, що у дизель-генераторних енергетичних установках засобів транспорту максимальний потенціал енергозбереження в декомпозованій системі досягається використанням схем зі змінною структурою і відповідних алгоритмів керування, за яких кожен силовий елемент декомпозованої структури своїм режимом роботи має досягти мінімального рівня втрат енергії у всій дизель-генераторній системі в цілому. Задачу загального керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку варіантів найбільш енергоефективної схеми змінної структури, законів та алгоритмів взаємодії між компонентами даної змінної структури, за яких досягаються всі робочі характеристики транспортного засобу.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань і підтвердження встановленої наукової гіпотези відповідно до мети роботи обрано методи досліджень, які базуються на системному підході та фундаментальних положеннях теорії енергетичних установок, електротехніки, електромеханіки, математичної фізики, теорії машинно-тракторних агрегатів та засобів транспорту. Для виконання декомпозиції дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту і розробки та аналізу математичної моделі декомпозованої структури використано синергетичний підхід, метод декомпозиції, метод динамічних індуктивностей, метод узагальнених векторів та операторний метод. Для дослідження енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в усталених режимах використано метод динамічних індуктивностей, елементи теорії автоматичного керування, методи рішення диференціальних рівнянь. Для дослідження енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в перехідних режимах використано елементи теорії автоматичного керування, методи рішення диференціальних рівнянь та математичний апарат варіаційного числення, концепція гнучких кінематичних траєкторій. Для аналізу енергетичної ефективності дизель-генераторних систем при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху використано теоретичні та емпіричні наукові методи, методи математичного та імітаційного моделювання, метод експериментального дослідження.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується коректним застосуванням розроблених аналітичних методів, збіжністю результатів, отриманих з використанням розроблених методів та експериментальних польових досліджень. При моделюванні ураховані нелінійні властивості та особливості структури реальних транспортних засобів і виникаючих відповідних енергетичних, електромеханічних та електромагнітних

процесів перетворення енергії в дизель-генераторних системах. Результати розрахунків порівнювались з результатами фізичних експериментів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

1. **Вперше** запропоновано узагальнену класифікацію дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту за тяговими потужностями та споживанням власних потреб, **що дозволяє** проводити узагальнення та уніфікацію підходів з проектування енергетичних установок, підвищення енергетичної ефективності управління рухом засобів транспорту.

2. **Вперше** запропоновано концепцію побудови системи автоматичного керування дизель-генераторними енергетичними установками засобів транспорту в перехідних режимах роботи на основі поєднання методів використання ройового інтелекту, нейронних мереж, гнучких кінематичних траєкторій та принципів термінального керування, **що дозволяє** реалізовувати необхідні види алгоритмів керування енергетичною установкою з урахуванням специфіки роботи засобу транспорту, дозволяє враховувати всі фазові кінематичні обмеження, долати відхилення від основної кривої руху та забезпечити підвищення рівня енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

3. **Вперше** виконано узагальнення та класифікацію декомпованих груп дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту за тяговими потужностями, зокрема, виділено групи елементів, які чинять значний вплив на рівень втрат, показано найбільш енергоефективні структури системи, **що дозволяє** проводити розробку та аналіз уніфікованих методик підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

4. **Вперше** доведено, що розробка системи керування енергетичною установкою в перехідних режимах роботи, алгоритм якої базується на мінімізації площі під кривою руху транспортного засобу (залежність пройденого шляху від часу) при існуванні обмежень на максимальні величини кінематичних характеристик руху (швидкість, прискорення, ривок) **призводить до** мінімізації тягової роботи з переміщення одиниці транспортного засобу з однієї точки на кривій руху до іншої.

5. **Отримала подальший розвиток** теорія декомпозиції, де **на відміну** від існуючих підходів щодо декомпозиції визначено критерії, ознаки та специфіку проведення декомпозиції дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, **що дозволяє** проводити розробку та аналіз методик підвищення енергетичної ефективності в усталених та перехідних режимах роботи енергетичної установки.

6. **Отримав подальший розвиток** синергетичний метод, де **на відміну** від існуючих підходів запропоновано розглядати засоби забезпечення найбільш енергоефективного режиму роботи енергетичної установки та керування кожним з елементів декомпованої структури та загального закону керування цими елементами одночасно поодиноці та у сукупності для усталених та перехідних режимів роботи, **що дозволяє** досягти найбільш раціонального питомого рівня споживання палива дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

7. **Отримав подальший розвиток** метод проектування дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту змінного струму, де **на відміну** від існуючих підходів показано, що розрахунок максимальної величини коефіцієнту корисної дії послідовно з'єднаних елементів як добутку величин максимального коефіцієнту корисної дії окремих елементів в загальному випадку дає невірне значення, адже точки максимуму функцій коефіцієнту корисної дії не досягаються при одній і тій самій потужності одночасно для кожного елемента системи, при цьому під час проектування величина максимального коефіцієнту корисної дії кожного елемента закладається для номінального струму навантаження, який здебільшого береться для кожного елемента системи із запасом для уникнення перевантажень, проте, як правило, завантаження транспортного засобу є значно меншим ніж номінальне (до того ж узятє із запасом), що призводить до зменшення фактичної величини коефіцієнту корисної дії в порівнянні з проектним максимальним значенням, **що дозволяє** визначати реальне значення максимальної величини коефіцієнту корисної дії послідовно з'єднаних елементів для всього діапазону робочих потужностей.

8. **Вдосконалено** метод динамічних індуктивностей, який **доопрацьовано** у частині врахування електричної та магнітної несиметричності контурів тягової машини і **поширено на новий клас систем** – тягові електромеханічні системи змінного струму, **що дозволяє** підвищити точність результату врахування процесів насичення та зменшити рівень витрат дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту через несиметричні електромагнітні процеси в обмотках тягового двигуна.

Вказані наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати у галузі електричної інженерії в сукупності вносять вклад у розв'язок важливої науково-прикладної проблеми галузі – зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, а також розв'язання практичної проблеми – зниження енергетичних витрат транспортної галузі.

***Практичне значення отриманих результатів:***

1. На основі виконаної декомпозиції, узагальнення та класифікації отриманих декомпонованих груп дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту по тяговим категоріям визначено граничні величини приросту статичного та динамічного коефіцієнтів корисної дії енергетичної системи, що дозволяє планувати та оцінювати заходи з підвищення енергоефективності енергетичної установки. Визначено, що сукупне підвищення статичного коефіцієнту корисної дії може сягати до 5% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 7% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт), та до 8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт), а сукупне підвищення динамічного коефіцієнту корисної дії може сягати до 4,6% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 6,8% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт), та до 7,8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт).

2. Виконано узагальнення та аналіз різних способів керування для дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту на різних профілях шляху, що дозволяє проводити інженерно-проектні роботи на основі вказаних способів для побудови енергоощадних підходів керування, розрахунки та моделювання для всього діапазону режимів роботи енергетичних установок.

3. Проведено аналіз схем дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту для короткочасного та довготривалого режиму роботи. В результаті цього відмічено значну схожість функціональних схем цих систем, що дозволило запропонувати створення універсальних схем для таких режимів роботи, як основи для розробки типових серій енергетичних установок. Такий підхід дозволяє уніфікувати підходи різних наукових шкіл та напрямків під час розробки типових серій енергетичних установок (наукові школи водного транспорту, залізничних тягових передач, мобільних енергетичних засобів, дорожньої техніки, міського та позаміського транспорту, військової техніки), що також дозволяє запозичити ефективні з практичної точки зору технічні рішення одних шкіл для використання іншими.

4. Запропонований метод вибору параметрів дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту з можливістю накопичення енергії дозволяє забезпечити встановлені тягові характеристики за умови простоти побудови, високу ефективність використання енергії та забезпечує роботу дизель-генераторної установки на економічній характеристиці.

5. Розроблений метод побудови моделей дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту з урахуванням процесів насичення та електричної і магнітної несиметричності контурів машини дозволяє проводити дослідження енергетичних, електромагнітних та електромеханічних характеристик, створювати системи та технології сучасного комплексного проектування, адже дозволяє досліджувати форму та показники перехідних процесів при будь-якому законі керування тяговим автономним інвертором напруги, враховуючи при цьому зміну параметрів силових кіл тягового двигуна внаслідок його насичення з урахуванням втрат у сталі двигуна, забезпечує адекватний опис процесів насичення тягової асинхронної машини і в порівнянні з існуючими моделями містить зменшену кількість рівнянь.

***Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи впроваджено:*** у науково-дослідній роботі фахівців Національного університету «Запорізька політехніка» при вико-

нанні плану наукових досліджень; у ТОВ «НДІ«Перетворювач» при розробці серійних перетворювачів частоти для електроприводів змінного струму для засобів транспорту; у ТОВ «СВО Азов» при модернізації парку дизель-електричних тракторів; у ТОВ «АгроТехноМаш» при розробці серійних тягових електропередач для засобів транспорту; у КП «Запоріжелектротранс» використані співробітниками служб електрогосподарства та руху для підготовки технічних документів, проведення наукових та організаційних заходів з питань перспектив рекуперації електричної енергії при застосуванні рекуперативного гальмування або накопичення енергії на електрорухомому складі міського електротранспорту м. Запоріжжя; у навчальному процесі Національного університету «Запорізька політехніка» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» під час викладання курсів «Енергозбереження по галузям виробництв», «Електромеханічні перехідні процеси», «Електромагнітні перехідні процеси», «Математичні задачі енергетики», під час написання курсових та дипломних проектів, випускних кваліфікаційних робіт; у науково-дослідній роботі фахівців Державного університету інфраструктури та технологій.

Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами.

**Особистий внесок автора.** Всі положення і результати дисертаційного дослідження, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Одноосібні наукові праці виконані автором особисто і самостійно, а внесок автора у праці, написані у співавторстві, зазначений безпосередньо біля кожної публікації відповідно до списку опублікованих праць, показаного в кінці даного автореферату.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 92 друкованих наукових працях (58 з них одноосібно, причому 13 опубліковано на англійській мові), у тому числі: 6 монографіях (1 з них одноосібно), 43 статтях у фахових виданнях (з них 7 статей у закордонних фахових наукових виданнях, 38 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз та мають імпаکت-фактор, включаючи 6 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), в 20 матеріалах конференцій та захищені 20 патентами України на винаходи і корисні моделі та авторськими свідоцтвами.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та 10 додатків. Загальний обсяг роботи складає 555 сторінок, у тому числі 325 сторінок основного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, наведена загальна характеристика роботи та основні положення і результати, що виносяться на захист.

У першому розділі «Сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту» на основі вітчизняної та закордонної науково-технічної літератури виконано аналіз особливостей проблеми підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, особливостей побудови енергоефективних структур дизель-генераторних систем. Також виділені науково-прикладні задачі щодо побудови енергоефективних дизель-генераторних енергетичних систем. В результаті проведеного аналізу особливостей проблеми підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту визначено, що на сьогодні виникає **протиріччя на практиці**, яке полягає у необхідності енергозбереження в усіх системах засобів транспорту та практичною неможливістю забезпечення розрахункових показників даного процесу, що пояснюється наявністю **протиріччя в теорії** щодо неможливості існуючих наукових методів зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту забезпечити максимально можливий потенціал енергозбереження для даних систем. Причиною виникнення даної ситуації є **контрадикція**, яка полягає у відсутності сучасної узгодженої єдиної методології, яка має поєднувати методи, принципи та підходи, методичні та алгоритмічні засоби розвитку наукових основ зменшення енергоємності дизель-генераторних енер-

гетичних установок засобів транспорту, що реалізовані у вигляді правил, методик та способів, які забезпечують виконання підвищення енергетичної ефективності енергоустановок засобів транспорту з урахуванням закономірностей між параметрами режимів роботи дизель-генераторних енергетичних установок та показниками енергетичної ефективності з урахуванням узгодження та оптимізації процесів взаємодії компонентів у енергетичних установках.

На основі проведеного аналізу науково-прикладної проблеми галузі, а також практичної проблеми поставлена мета дослідження. Для досягнення визначеної мети **на основі підходів стратифікації, композиції, локалізації та варіантфікації** побудови науково-прикладної проблеми поставлено основні завдання дослідження. Відповідно до цього визначено об'єкт та предмет дослідження, наукову гіпотезу.

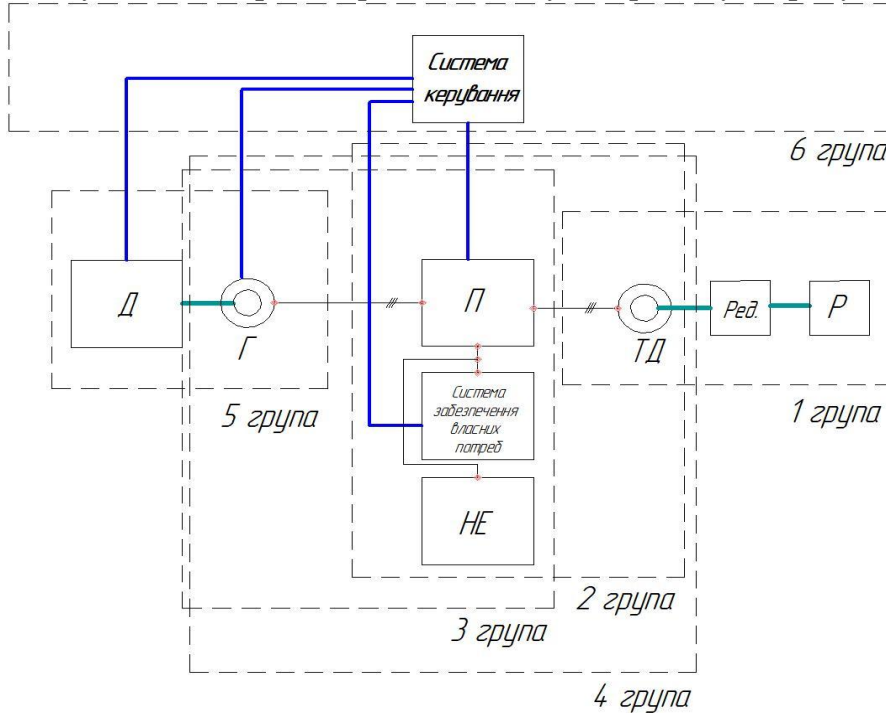
Огляд літературних джерел підтвердив перспективність та актуальність обраного напрямку дослідження. Наприкінці першого розділу обрані методи проведення дослідження.

У **другому розділі «Декомпозиція дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту і розробка та аналіз математичної моделі декомповованої структури»** по-перше визначено критерії проведення декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки. Показано, що вирішити завдання підвищення енергетичного потенціалу енергетичної установки можливо тільки комплексно – розглядаючи встановлений режим роботи всієї системи взагалі, з урахуванням умов раціональної роботи її окремих компонентів за умови врахування взаємозв'язку між ними. Адже досить частою є практична ситуація, коли раціональний режим роботи окремих елементів енергетичної установки та оптимальне керування ними не призводить до роботи всієї системи на економічній характеристиці, що як наслідок збільшує споживання рівня дизельного палива. І навпаки, штучний примус роботи дизеля на економічній характеристиці призводить до роботи вказаних елементів всієї енергетичної установки зі значними втратами потужності. Використання комплексного, взаємопов'язаного підходу, за якого обирається найбільш енергоефективний режим роботи всієї системи, причому кожний елемент системи працюватиме у найбільш енергетично ощадному режимі, котрий є тільки можливим за такого стану енергетичної установки, дозволяє вирішити вказану проблему, що можливо виконати з урахуванням синергетичних властивостей енергетичної установки. При виборі структури енергетичної установки необхідно виходити з положення, що первинна силова установка, тяговий генератор, тяговий перетворювач, система власних потреб, тяговий двигун та пара редуктор рушій розглядаються не як окремі компоненти чи підсистеми для підвищення їх енергетичного потенціалу, а як складові частини всієї енергетичної установки, енергетичний потенціал якої повинен максимізуватись за обраними принципами лише в цілому. При цьому рішення окремих завдань щодо даних підсистем є необхідним лише для забезпечення вибору раціональних показників роботи всієї енергетичної установки.

В рамках онтології Бунге-Ванда-Вебера сформульовано критерії декомпозиції енергетичної установки. При цьому при проведенні декомпозиції повинні бути збережені властивості системи, не повинно бути втрачено їх при розкладанні і не додано нових. Для дизель-генераторної енергетичної установки доцільною є декомпозиція за єдиною ознакою. В якості ознаки декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки може бути обрано: значний вплив виділеної декомповованої структури на рівень втрат (ККД, енергетичний потенціал); можливість об'єднання виділеної декомповованої структури в один спільний алгоритм керування; можливість отримання за рахунок виділеної декомповованої групи енергетичної установки зі змінною структурою; схоже функціональне призначення частин енергетичної установки; єдність конструктивної будови частин енергетичної установки; структурні ознаки частин енергетичної установки (вид схеми, способи роботи чи з'єднання); зв'язок етапів роботи і енергетичних, електро-механічних чи електромагнітних процесів частин енергетичної установки; предметні характеристики частин енергетичної установки (ККД, набір технологічних показників і т.д.); єдиний діапазон роботи; суттєвий вплив параметрів роботи декомповованої частини на загальні показники роботи всієї енергетичної установки; взаємний вплив частин енергетичної установки.

Сформульовано критерії декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки: 1. В результаті проведення декомпозиції повинні бути збережені всі властивості системи і не повинно додатись нових. 2. Будь-яка підсистема дизель-генераторної енергетичної установки на будь-якому рівні декомпозиції повинна містити мінімальне число змінних стану. 3. Будь-яка зовнішня дія для елемента декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки на будь-якому рівні ієрархії має або бути визначеною внутрішніми енергетичними, електромеханічними та електромагнітними перехідними процесами для іншого елемента декомпозиції, або зовнішнім чинником збурення для всієї енергетичної установки. 4. Мінімальна зв'язність і максимальне зчеплення внутрішніх енергетичних, електромеханічних та електромагнітних перехідних процесів.

Потому розглянуто декомпозицію типової послідовної структури дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу, зображену на рисунку 1.



Д – дизель;  
Г – генератор;  
НЕ – накопичувальний елемент;  
П – перетворювач;  
ТД – тяговий двигун;  
Ред – редуктор;  
Р – рушій.

Рисунок 1 – Структурна схема дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу

Для цього виконано декомпозицію структурної схеми енергетичної установки, представлену на рис. 1, на відповідні групи (біля кожної групи вказано відповідність поставленій ознаці декомпозиції): 1 група: тяговий двигун – редуктор – рушій (відбувається зміна параметрів механічної енергії та перетворення електричної енергії в механічну, причому характеристики даних елементів жорстко між собою пов'язані і мають безпосередній вплив на роботу енергетичної установки); 2 група: перетворювач – тяговий двигун (відбувається зміна параметрів електричної енергії та її перетворення з одного виду в інший з регулюванням); 3 група: генератор – перетворювач (відбувається зміна параметрів електричної енергії та її перетворення з одного виду в інший з регулюванням); 4 група: генератор – перетворювач – тяговий двигун (відбувається зміна параметрів електричної енергії та її перетворення з одного виду в інший з регулюванням); 5 група: дизель – генератор (відбувається зміна параметрів механічної та електричної енергії та перетворення механічної енергії в електричну); 6 група: загальна система керування всіма ланками та системою в цілому. Показано, що для використання синергетичних властивостей енергетичної установки необхідно розглядати внутрішні взаємодії між елементами загальної замкнутої системи для досягнення максимального ефекту роботи всієї системи, а не лише окремого об'єкта чи підсистеми. Тобто побудову структури такої системи необхідно розглядати в напрямку врахування взаємних впливів між компонентами декомпонованої структури. Виконано класифікацію дизель-генераторних енергетичних установок в залежності від потужності відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту по категоріям потужності

Категорія потужності	Тягова потужність, кВт	Частина споживання загальної потужності на забезпечення власних потреб	Види дизель-генераторних транспортних засобів, що належать до даної категорії потужності
I	до 70	4-30% (живлення в основному від допоміжних генераторів)	- дизель-електроходні судна з енергоустановкою до 100 к.с.; - міні-трактори; - навантажувачі; - легкі самохідні шасі; - трактори до класу 2; - легка будівельна та дорожня техніка; - допоміжні машини та самохідні установки залізниць.
II	70-300	6-25% (живлення від допоміжних генераторів або загальної шини постійного струму)	- дизель-електроходні судна з енергоустановкою 100-400 к.с.; - трактори класів 3 - 8; - військова техніка та транспорт; - будівельна та дорожня техніка; - рейкові автобуси; - допоміжні машини та самохідні установки залізниць; - автотриси; - допоміжні кар'єрні транспортні засоби; - локомотиви; - міський комунальний транспорт.
III	більше 300	8-20% (живлення в основному від загальної шини постійного струму)	- дизель-електроходні судна з енергоустановкою понад 400 к.с.; - трактори класів більше 8; - комбайни; - локомотиви; - військова техніка та транспорт; - важка будівельна та дорожня техніка; - кар'єрні самоскиди; - приміський рухомий склад; - маневровий рухомий склад.

Запропонована класифікація охоплює всі основні категорії дизель-генераторних енергетичних установок по категоріям потужності, для яких властиві ті чи інші уніфіковані підходи.

Виконано групування основних структур елементів декомпозованої системи відповідно до запропонованої класифікації, взаємозв'язок між якими дозволяє максимально використати синергетичні властивості енергетичної установки. Варіанти структур групи «тяговий двигун-редуктор» наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Варіанти структур групи «тяговий двигун - редуктор»

Структура елементів групи	Категорія потужності		
	I	II	III
Редуктор зі змінною кількістю ступенів – Тяговий двигун			
Безредукторна система (мотор-колесо)			
Тяговий двигун спеціальної конструкції – Редуктор			

Варіанти структур групи «перетворювач - тяговий двигун» наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Варіанти структур групи «перетворювач - тяговий двигун»

Структура елементів групи	Категорія потужності		
	I	II	III
Перетворювач частоти – Тяговий двигун спеціальної конструкції			
Багаторівневий перетворювач частоти – Тяговий двигун змінного струму			
4q-перетворювач – Тяговий двигун			
Використання накопичувача енергії			

Варіанти структур групи «генератор - перетворювач» наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Варіанти структур групи «генератор - перетворювач»

Структура елементів групи	Категорія потужності		
	I	II	III
Генератор – Перетворювач – Загальна шина постійного струму			
Генератор – Безпосередній перетворювач частоти			
Генератор – Накопичувальна система – Перетворювач			

Варіанти структур групи «генератор - перетворювач - двигун» наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Варіанти структур групи «генератор - перетворювач - тяговий двигун»

Структура елементів групи	Категорія потужності		
	I	II	III
Система Генератор – Тяговий двигун (без тягового перетворювача з живленням власних потреб від допоміжного генератора)			
Генератор – Перетворювач – Загальна шина постійного струму – Тяговий двигун			
Генератор – Перетворювач – Загальна шина постійного струму з накопичувальною системою – Тяговий двигун			

Варіанти структур групи «дизель - генератор» наведено в таблиці 6.

Таблиця 6 – Варіанти структур групи «дизель - генератор»

Структура елементів групи	Категорія потужності		
	I	II	III
Дизель – Швидкохідний синхронний генератор			
Дизель – Генератор з суміщеними обмотками			
Дизель з наддувом або форсуванням – Генератор			
Дизель-компресор – Генератор з можливістю роботи в режимі двигуна			

Далі виділено особливості формалізації задачі вибору та оцінки комбінацій структурних варіантів декомпозованої схеми. Задача вибору комбінацій структурних варіантів декомпозованої схеми полягає у пошуку технічних засобів, впровадження яких дозволить забезпечити максимальне підвищення енергоефективності енергетичної установки. Припустимо що  $P$  являє собою множину всіх можливих засобів з підвищення енергоефективності енергетичної установки. При цьому множина  $P$  має таку властивість, що певні її складові підмножини можна використовувати одночасно, а інші підмножини лише поодино, що пояснюється несумісністю одночасного виконання певних організаційно-технічних заходів. Тому розділимо множину  $P$  на визначені підмножини: підмножина  $P_1$  включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «тяговий двигун-редуктор-рушій» (таблиця 2), підмножина  $P_2$  включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «перетворювач - тяговий двигун» (таблиця 3), підмножина  $P_3$  включає в себе

засоби, які буде впроваджено в підсистемі «генератор-перетворювач» (таблиця 4), підмножина  $P_4$  включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «генератор-перетворювач - тяговий двигун» (таблиця 5), підмножина  $P_5$  включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «дизель- генератор» (таблиця 6), підмножина  $P_6$  включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «загальна система керування всіма ланками та системою в цілому» (будуть розглянуті окремо). Кожному засобу поставимо у відповідність ефект від його впровадження, який в загальному випадку виражається у скороченні питомої витрати дизеля. Нехай підмножина  $P_1$  включає в себе  $z_1$  засобів (таблиця 2), підмножина  $P_2$  включає в себе  $z_2$  засобів (таблиця 3), підмножина  $P_3$  включає в себе  $z_3$  засобів (таблиця 4), підмножина  $P_4$  включає в себе  $z_4$  засобів (таблиця 5), підмножина  $P_5$  включає в себе  $z_5$  засобів (таблиця 6), підмножина  $P_6$  включає в себе  $z_6$  засобів. Введемо позначення:  $n$  – номер засобу з підвищення енергетичної ефективності. Тоді розглянемо масиви  $V(n)$  та  $E(n)$ , які містять вартість і вихідні ефекти від впровадження відповідних заходів визначених підмножин. Нехай при цьому вектор  $x(n)$  містить елементи, які дорівнюють 0 в разі коли відповідний захід з підвищення енергетичного потенціалу відхилено або 1 в протилежному випадку. Сформулюємо математичну модель для вказаної задачі пошуку засобів підвищення енергетичного потенціалу системи в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = P_1 \cap P_2 \cap P_3 \cap P_4 \cap P_5 \cap P_6; \\ \Phi(x) = \sum_{s=1}^{z_1} V_1(n) \cdot x_1(n) + \sum_{s=1}^{z_2} V_2(n) \cdot x_2(n) + \sum_{s=1}^{z_3} V_3(n) \cdot x_3(n) + \\ + \sum_{s=1}^{z_4} V_4(n) \cdot x_4(n) + \sum_{s=1}^{z_5} V_5(n) \cdot x_5(n) + \sum_{s=1}^{z_6} V_6(n) \cdot x_6(n) \rightarrow \min; \quad (1) \\ \sum_{s=1}^{z_1} E_1(s) \cdot x_1(n) + \sum_{s=1}^{z_2} E_2(n) \cdot x_2(n) + \sum_{s=1}^{z_3} E_3(n) \cdot x_3(n) + \\ + \sum_{s=1}^{z_4} E_4(n) \cdot x_4(n) + \sum_{s=1}^{z_5} E_5(n) \cdot x_5(n) + \sum_{s=1}^{z_6} E_6(n) \cdot x_6(n) \leq E. \end{array} \right.$$

Масиви  $E(n)$  в якості показників ефективності містять наступні параметри: питомий вартісний показник, поточне значення питомої витрати палива, мінімальну питому витрату палива, номінальний ККД системи, тривалість ввімкнення. У якості питомого вартісного показника пропонується залежність вартості енергетичної установки від потужності.

Показано, що рішення задачі вибору засобів з підвищення енергетичного потенціалу дизель-генераторної енергетичної установки необхідно виконувати послідовно, по-перше сформувавши множину всіх можливих засобів з підвищення енергоефективності енергетичної установки. По-друге необхідно провести вибір комбінацій варіантів підмножин засобів. По-третє потрібно встановити відповідну цільову функцію, а також визначити обмеження та межові умови. Сукупність усіх технічних і схемних модифікацій кожної групи декомпованої структури енергетичної установки, що дозволяють підвищити енергетичний потенціал останньої і являє собою необхідний перелік заходів, які необхідно здійснити для максимальної економії палива при функціонуванні системи. Даний перелік буде залежати від результатів розв'язку оптимізаційного завдання та технологічних особливостей процесів системи. Застосування при формуванні зазначених заходів процесу визначення структури та параметрів системи, що опирається на комплексний розв'язок усіх основних завдань розробки системи заходів з підвищення енергетичного потенціалу, дозволяє одержати коректне трансформування останньої. Тобто при потенційній реалізації пропонованих змін у системі є їхній взаємовплив.

В якості методу вирішення оптимізаційної задачі використано метод рою часток. Хоча в якості альтернативи пропонується у всіх випадках, де проводиться пошук локальних мінімумів і максимумів нелінійних функцій від двох і більше змінних, використовувати метод мінімізації по зв'язаних напрямках, що не використовує похідні – метод Powell'64.

На основі даних про тяговий двигун криголаму дизель-електроходу «Капітан Белоусов» (рисунок 2) побудовано характеристики розгону та гальмування з розробленою системою регулювання енергетичної установки, які представлені на рисунку 3.



Рисунок 2 – Криголам дизель-електроход «Капітан Белоусов»

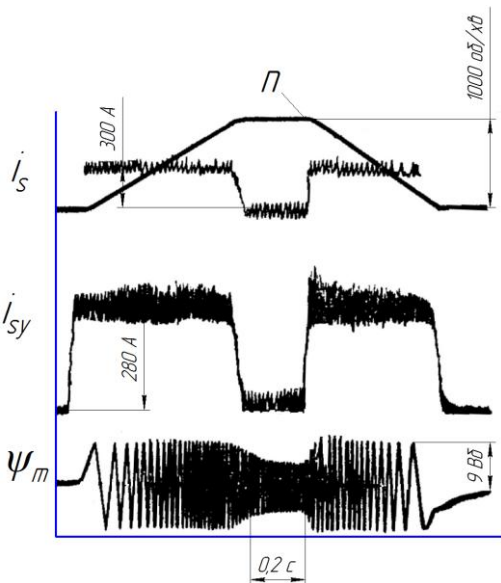


Рисунок 3 – Характеристики розгону та гальмування тягового двигуна криголаму дизель-електроходу «Капітан Белоусов» з розробленою системою регулювання енергетичної установки

Наведені перехідні характеристики показують стабільність роботи розробленої системи регулювання енергетичної установки при варіації активного опору статорного кола тягового двигуна в 1,5 рази. Особливістю розробленої системи регулювання енергетичної установки є її структура, всі коефіцієнти якої залежать лише від параметрів реальної енергетичної установки, що спрощує налаштування в реальних умовах і не потребує при цьому проведення додаткового моделювання, прогнозування чи окремих довідкових даних, а лише потребує вимірювання статичних показників енергетичної установки.

Також в даному розділі розроблено математичні моделі для кожної з груп декомпозиції для дослідження статичних та динамічних процесів, під час чого дістав подальшого розвитку метод математичного описання енергетичних систем в рамках якого розроблена загальна математична модель дизель-генераторної енергетичної установки, адекватної динамічному комплексу автономної системи енергоживлення в усьому діапазоні можливих навантажень і здатної до швидкої перебудови при зміні конструкції системи (ввімкнення або відключення її окремих компонентів), а також при зміні режиму роботи. Розроблена математична модель на основі концепції динамічних індуктивностей дозволяє враховувати насичення магнітної системи тягового двигуна та електричну або магнітну несиметричність контурів машини.

У третьому розділі «Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в усталених режимах робо-

Варіація значень активного опору статорного кола тягового двигуна для роботи енергетичної установки в межах від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  зміни температури її елементів складає 1,5 кратну зміну. Для оцінки нечутливості зміни швидкодії отриманої передаточної функції регулятора в залежності від зміни опору статорного кола побудуємо його перехідну характеристику, яку показано на рисунку 4.

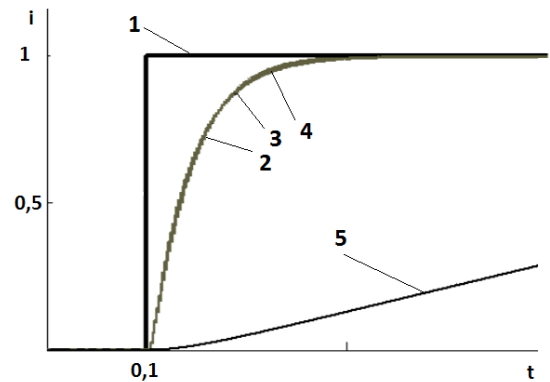


Рисунок 4 – Характеристики синтезованого регулятора струму криголаму дизель-електроходу «Капітан Белоусов» в залежності від ступінчатого завдання на струм (1) при номінальному значенні опору статорного кола (2), при збільшенні в 1,5 рази від номінального значення (3) та зменшенні в 1,5 рази опору статорного кола від номінального (4) та зміна частоти обертання вала двигуна (5)

ти» по-перше показано особливості впливу декомпозиції на функцію статичного коефіцієнту корисної дії енергетичних установок.

Відзначено, що стандартна методика вибору елементів схеми дизель-генераторної енергетичної установки передбачає визначення необхідної сили тяги, потому розрахунок необхідної потужності на валу тягового двигуна з урахуванням технічних параметрів транспортного засобу та передаточного числа тягового редуктора, а потому обирається тяговий двигун, тяговий перетворювач частоти та синхронний генератор, дизельний двигун (тобто фактично потужність дизеля обирається за розрахованою потужністю на виході тягового двигуна з урахуванням втрат. Відмічено, що при цьому під час проектування величина максимального ККД закладається для номінального струму навантаження, який здебільшого береться для кожного елемента енергетичної установки із запасом для уникнення перевантажень. Проте, як правило, завантаження транспортного засобу є значно меншим ніж номінальне (до того ж узятє із запасом), що призводить до зменшення фактичної величини ККД в порівнянні з проектним максимальним ККД. Окрім того такий підхід не враховує розподіл статичного ККД дизель-генераторної енергетичної установки в залежності від потужності, що дозволить зменшити питому витрату палива на виконання тягової роботи. Пояснимо останнє твердження на прикладі двох кривих (рисунок 5). Нехай наявні дві залежності статичного ККД від величини потужності, які наведені на рисунку 5. Перша функція  $\eta_1(P)$  досягає свого максимуму в точці А при потужності  $P_1$ , де її статичний ККД складає  $\eta_1$ . При цьому статичний ККД другої функції  $\eta_2(P)$  при потужності  $P_1$  в точці В складає  $\eta_3$ . Друга функція  $\eta_2(P)$  досягає свого максимуму в точці С при потужності  $P_2$ , де її статичний ККД складає  $\eta_2$ . При цьому статичний ККД першої функції  $\eta_1(P)$  при потужності  $P_2$  в точці D складає  $\eta_4$ . З описаного приходимо до висновку, що величини статичних ККД функцій  $\eta_1(P)$  та  $\eta_2(P)$  досягаються при різних величинах потужностей і випадковим чином не можуть бути досягнуті одночасно. Отже розрахунок загальної величини статичного ККД як добутку ККД окремих груп елементів в загальному випадку є невірним і дає неправильне значення максимальної величини статичного ККД послідовно з'єднаних елементів дизель-генераторної енергетичної установки, адже точки максимуму функцій статичного ККД не досягаються при одній і тій самій потужності одночасно. Для точного розрахунку загальної величини статичного ККД по-перше визначається загальна функція статичного ККД дизель-генераторної енергетичної установки від потужності.

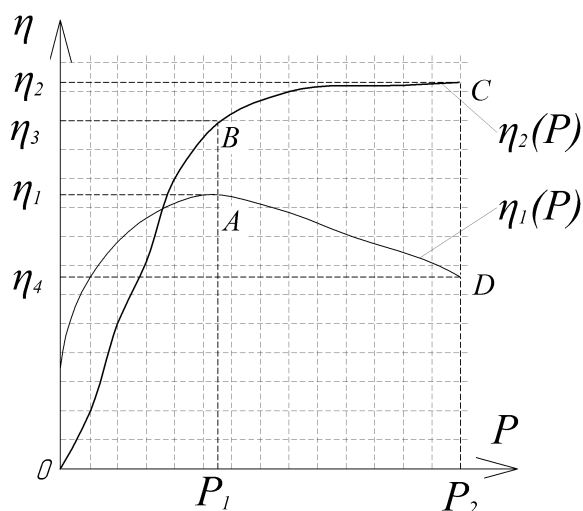


Рисунок 5 – Залежність ККД двох випадкових елементів від потужності

Особливо відмітимо, що при цьому під час проектування величина максимального ККД закладається для номінального струму навантаження, який здебільшого береться для кожного елемента енергетичної установки із запасом для уникнення перевантажень. Проте, як правило, завантаження транспортного засобу є значно меншим ніж номінальне (до того ж узятє із запасом), що призводить до зменшення фактичної величини ККД в порівнянні з проектним максимальним ККД.

По-друге знаходиться точка екстремуму даної функції (їх може бути декілька).

По-третє знаходиться максимальна величина статичного ККД дизель-генераторної енергетичної установки в знайдених точках екстремуму.

Такий підхід дозволяє точно і вірно визначити величину максимального статичного ККД дизель-генераторної енергетичної установки.

Отже показано, що основною проблемою недовикористання енергетичного потенціалу енергетичної установки є помилковий підхід під час проектування такої системи, за якого кожен елемент системи обирається лише з огляду на величину його ККД та виробника (за умови однакових технічних характеристик, які повністю задовольняють вимогам проекту).

Далі в розділі виявлено для запропонованої класифікації дизель-генераторних систем по категоріям потужності межі приросту величин статичного ККД декомпованих груп систем. Для цього визначено граничні криві статичного ККД в межах кожної категорії потужності (рисунки 6-8).

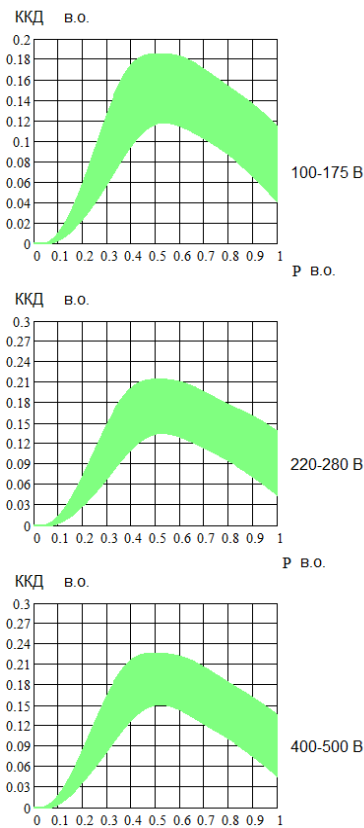


Рисунок 6 – Поле межових значень статичного ККД для загальної дизель-генераторної енергетичної установки I категорії потужності (до 70 кВт)

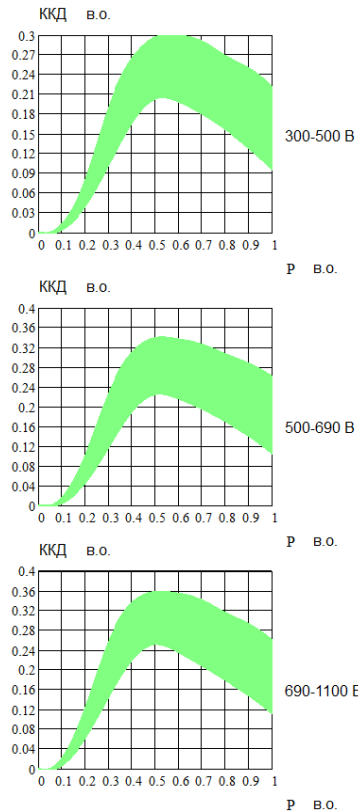


Рисунок 7 – Поле межових значень статичного ККД для загальної дизель-генераторної енергетичної установки II категорії потужності (від 70 кВт до 300 кВт)

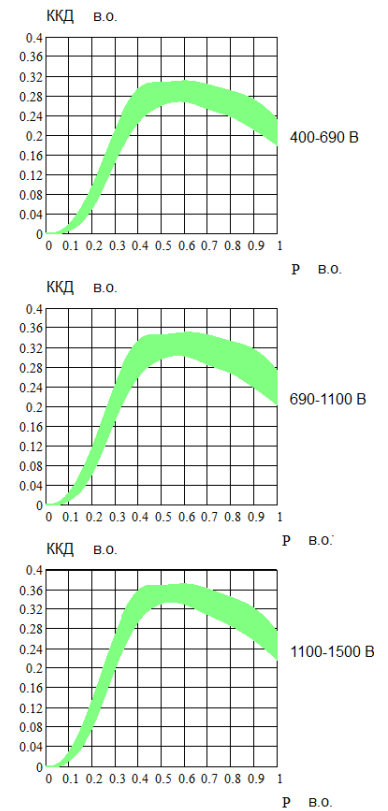


Рисунок 8 – Поле межових значень статичного ККД для загальної дизель-генераторної енергетичної установки III категорії потужності (більше 300 кВт)

Визначено, що в сукупності підвищення статичного ККД за рахунок використання синергетичних властивостей енергетичної установки дозволяє збільшити загальний статичний ККД до 5% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 7% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт) та до 8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт) за рахунок використання: дизелів з наддувом та форсуванням; швидкохідних генераторів; багаторівневих перетворювачів частоти; безредукторних систем; тягових двигунів спеціальної конструкції (з перемиканням між обмотками та полюсами); оптимального вибору величини напруги енергетичної установки; системи зі змінною структурою, яка дозволяє змінювати топологію енергетичної установки шляхом перемикання з одного варіанту на інший (наприклад шляхом послідовного чи паралельного ввімкнення груп перетворювачів).

Запропоновано під час проектування системи враховувати особливості майбутньої експлуатації, зокрема проектувати систему таким чином, щоб найбільш ймовірна робоча точка співпадала з точкою максимуму функції ККД всієї енергетичної установки.

Запропоновано метод підвищення енергоефективності дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу за статичними характеристиками, за яким на відміну від існуючих методів використовуються синергетичні властивості декомпованих елементів енергетичної установки під час його проектування шляхом вибору таких елементів декомпованої структури, у яких точка екстремуму функції статичного ККД лежить в мінімальному околі точки екстремуму кривої статичного ККД дизельного двигуна, що дозволяє отримати максимальну величину статичного ККД всієї структури для повного використання енергетичного потенціалу системи.

Показано, що підвищення енергетичного потенціалу дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу за статичними характеристиками базується на декомпозиції структури системи, де кожен її елемент має забезпечити мінімальний рівень втрат енергії у всій системі в цілому, причому задачу керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку таких законів керування декомпозованими групами системи, за яких повністю використовується енергетичний потенціал системи. Виконано аналіз взаємного впливу груп декомпозованої структури на підвищення енергетичного потенціалу за статичними характеристиками, в ході якого показано вплив кожної підсистеми та їх взаємного зв'язку енергетичної установки на загальний рівень питомого рівня споживання палива та статичного ККД системи. На основі даного аналізу встановлено, що вагомим резервом підвищення енергетичного потенціалу системи за статичними характеристиками є відповідний вибір та компоновання елементів груп декомпозованої структури енергетичної установки, за рахунок чого можна підвищити статичний ККД. Проведено аналіз схем енергетичної установки для довготривалого режиму роботи транспортного засобу. В результаті цього відмічено значну схожість функціональних схем цих систем, що дозволило запропонувати створення універсальної схеми, як основи для розробки типових серій енергетичних установок. Такий підхід дозволяє уніфікувати підходи різних наукових шкіл та напрямків під час розробки типових серій енергетичних установок (наукові школи водних засобів транспорту, військової техніки, залізничних тягових передач, мобільних енергетичних засобів, дорожньої техніки, міського та позаміського транспорту), що також дозволяє запозичити ефективні з практичної точки зору технічні рішення одних шкіл для використання іншими.

При усталеному русі, виконанні механічної роботи та при русі у позаміському режимі є типовою довготривала система роботи енергетичної установки з нечастими ділянками розгону, зупинки, що не дозволяє накопичувати значну кількість механічної енергії та використовувати її для забезпечення живлення тягової системи. Проте, при встановленні накопичувача, достатнього для використання в якості живлення певних власних потреб, зарядити який можливо при довготривалому режимі роботи, можна отримати значний ефект. Перспективну схему енергетичної установки для довготривалого режиму, представлено функціональною схемою рисунок 9.

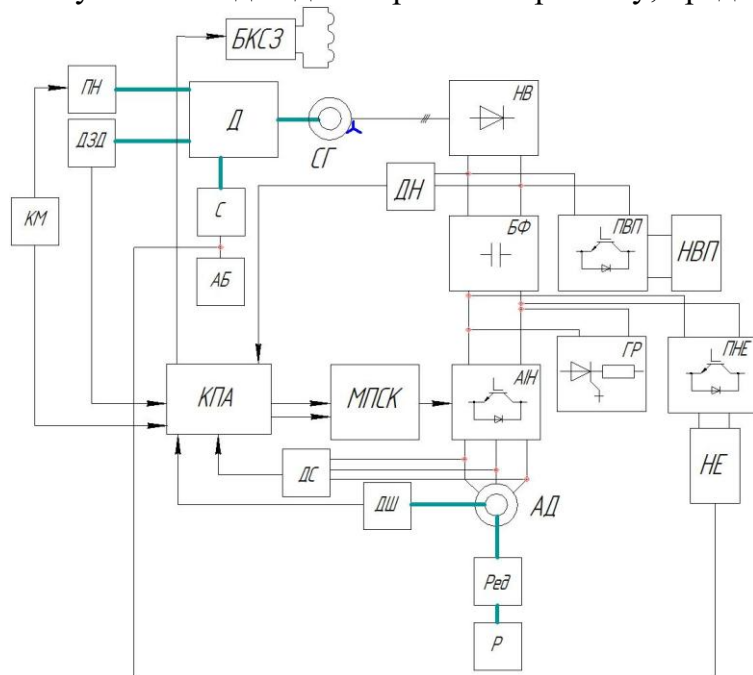


Рисунок 9 – Функціональна схема енергетичної установки для довготривалого режиму роботи

Вона складається з дизеля Д, двохобмоточного синхронного генератора СГ, некероаних випрямлячів НВ, до кожного з яких підключено гальмівний резистор ГР, блок фільтрів БФ, автономний інвертор напруги АИ, давач швидкості ДШ. В каналі керування АИ міститься комплексний пристрій автоматики КПА, до якого входять сигнали зворотного зв'язку за швидкістю і фазним струмом з асинхронного двигуна АД, сигнал давача завантаження дизеля ДЗД. Керуючий сигнал  $U_{KM}$  від комп'ютера машиніста КМ діє на рівень подачі палива паливним насосом ПН до дизеля Д. Відповідно до швидкості обертання колінчатого вала дизеля ДЗД, що механічно зв'язаний з дизелем, формує сигнал про завантаженість дизеля, який подається до КПА.

Перетворювач для забезпечення власних потреб ПВП підключено до загальної шини постійного струму. Сигнали, що входять до КПА обробляється за певними законами в залежності від режиму роботи і подаються на регулятори частоти та струму, вбудовані до КПА.

З огляду на проведені дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності декомпованих дизель-генераторних енергетичних систем в статичних режимах можна визначити переваги запропонованого варіанту декомпозиції енергетичної установки транспортного засобу.

1. Наведений варіант декомпозиції дозволяє виділити ланку, яка чинить найбільш сильний вплив на підвищення енергетичного потенціалу групи. Це дозволяє замінити лише цю ланку в групі декомпозиції, або покращити її характеристики для підвищення енергетичного потенціалу всієї системи і досягнення синергетичного ефекту.

Так, при проектуванні нової системи найбільш доцільним є:

- використання запропонованих варіантів рекомендаційних уніфікованих схеми енергетичної установки для забезпечення підвищеного енергетичного потенціалу транспортних засобів;
- заміна елементів декомпованих груп, які чинять найбільший вплив на енергетичний потенціал всієї системи.

В разі модернізації існуючої системи доцільним є часткова заміна елементів декомпованих груп, які чинять найбільший вплив на енергетичний потенціал всієї системи.

Таким чином під час модернізації існуючої системи найбільшої ефективності можливо досягти за рахунок заміни або покращення характеристик генератора та тягового двигуна.

2. Запропонована декомпозиція враховує значний вплив виділеної декомпованої структури на загальний рівень втрат (ККД, енергетичний потенціал).

3. Враховано можливість об'єднання виділеної декомпованої структури в один спільний алгоритм керування або один загальний блок (наприклад дизель та генератор в дизель-генератор, двигун та редуктор в мотор-колесо).

4. Існує можливість отримання за рахунок виділеної декомпованої групи енергетичної установки зі змінною структурою.

5. Враховано схоже функціональне призначення частин енергетичної установки, єдність конструктивної будови частин енергетичної установки, структурні ознаки (вид схеми, способи роботи чи з'єднання), зв'язок етапів роботи і енергетичних, електромеханічних чи електромагнітних процесів.

6. Враховується взаємний вплив частин енергетичної установки.

Також виконано аналіз взаємного впливу електричних та неелектричних елементів в межах однієї групи декомпозиції на величину загального статичного ККД. Значного впливу на величину загального статичного ККД всієї системи можна досягти завдяки взаємному впливу в межах групи елементів тяговий двигун-редуктор. Для збільшення статичного коефіцієнту корисної дії ланки двигун-редуктор необхідно зменшувати передаточний коефіцієнт тягового редуктора до мінімально можливого значення, яке зазвичай обмежене можливостями вибору відповідного за параметрами тягового електродвигуна. Тобто для збільшення статичного ККД енергетичної системи необхідно разом зі зменшенням передаточного числа тягового редуктора обрати тяговий двигун зі зменшеною частотою обертання та збільшеним тяговим моментом. Маховий момент обертових мас кожної окремої декомпованої групи ( $GD^2$ ), приведений до рушія, створює суттєвий вплив на динамічні властивості всього транспортного засобу та показники статичного та динамічного ККД. Тому для підвищення енергетичного потенціалу кожної декомпованої групи актуальним є зменшення махового моменту обертових мас ( $GD^2$ ).

В дослідженні сформульовано критерій взаємного впливу електричних та неелектричних елементів в межах однієї групи декомпозиції двигун-редуктор: доки відношення суми махових моментів обертових мас  $GD^2$  тягового двигуна зі зменшеною частотою обертання та збільшеним тяговим моментом та редуктора зі зменшеним передаточним числом до суми махових моментів обертових мас  $GD^2$  тягового двигуна звичайної конструкції та редуктора зі збільшеним передаточним числом менше ніж квадрат відношення передаточних чисел тягових редукторів зі зменшеним передаточним числом та збільшеним передаточним числом статичний ККД групи декомпозиції двигун-редуктор для варіанту такої групи з тяговим двигуном зі зменшеною частотою обертання та збільшеним тяговим моментом - редуктор зі зменшеним передаточним числом бу-

де більшим, ніж у варіанту такої групи зі звичайним тяговим двигуном та редуктором зі збільшеним передаточним числом.

У четвертому розділі «Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в перехідних режимах роботи» по-перше визначено ряд факторів від яких залежить динамічний ККД енергетичної установки (конструктивні особливості і характеристики кожної окремої декомпозованої групи; експлуатаційні параметри руху транспортного засобу; технічний стан транспортного засобу; конкретний режим руху; особливості ведення транспортного засобу тим чи іншим оператором).

Визначено, що в сукупності підвищення динамічного ККД за рахунок використання синергетичних властивостей енергетичної установки дозволяє збільшити загальний статичний ККД до 4,6% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 6,8% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт) та до 7,8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт) за рахунок використання: енергоощадних алгоритмів керування; режимів роботи дизелів; швидкохідних синхронних генераторів; багаторівневих перетворювачів частоти; безредукторних систем; накопичувачів; особливостей побудови живлення системи власних потреб (використанням спільної шини постійного струму або окремого генератора для живлення); тягових двигунів з перемиканням між обмотками та полюсами; використання системи зі змінною структурою, яка дозволяє змінювати топологію енергетичної установки шляхом перемикання з одного варіанту на інший (наприклад шляхом послідовного чи паралельного ввімкнення груп перетворювачів).

Показано, що для забезпечення мінімального рівня споживання палива дизель-генераторною системою на коротких дистанціях руху найбільш оптимальним є підтримка величини середньої швидкості руху на одному рівні за умови максимального використання дозволеного рівня прискорення та ривка для якомога швидшого виходу на встановлений рівень швидкості. Енергоефективне керування окремим елементом декомпозованої енергетичної установки не гарантує найбільш енергоефективного режиму роботи всієї системи в цілому. З точки зору керування дизелем оптимальним буде таке керування, за якого підтримується майже сталою величиною його потужності. Проте, проведений аналіз показує, що регулювання потужності дизеля в загальному випадку дозволить забезпечити мінімізацію рівня споживання палива завдяки підтримці середньої величини швидкості руху на одному рівні.

Проаналізовано керування дизель-генераторною системою на коротких дистанціях руху внаслідок чого встановлено та обґрунтовано послідовність керування перетворювачем частоти в залежності від фаз руху.

Варто відмітити, що знання енергоефективних алгоритмів керування не дозволяє одразу побудувати оптимальну систему керування динамікою транспортного засобу, оскільки такі алгоритми отримано за ідеалізованих умов і не враховують низки важливих моментів: обмеженість потужності дизеля; обмеження за максимальним прискоренням; обмеження за максимальним ривком; обмеження за максимальною швидкістю.

Якщо функція питомого додаткового опору руху є постійною, або змінюється в незначних межах, то загальна структура оптимального керування динамічними характеристиками руху слідує з теореми Ейлера: в початковий момент після рушання, коли швидкість руху мала, основним параметром регулювання для керування динамічними характеристиками руху є обмеження за прискоренням та ривком – тобто транспортний засіб повинен рухатись з максимально можливою величиною прискорення та ривка. Далі, по мірі збільшення швидкості, буде збільшуватись потужність, яка відбирається від дизеля. В той момент коли дана потужність досягне максимально можливого значення, енергетична установка переходить до режиму роботи з максимальною потужністю, проте швидкість і далі повинна збільшуватись за рахунок регулювання потокозчеплення тягового двигуна. Дане збільшення відбувається до певної величини середньої швидкості руху.

Режим ведення дизель-генераторного транспортного засобу можна розділити на певні фази: розгін; усталений рух; рух в режимі вибігу; гальмування; зупинка.

Дані фази можна проілюструвати узагальненою діаграмою руху, яка наведена на рисунку 10.

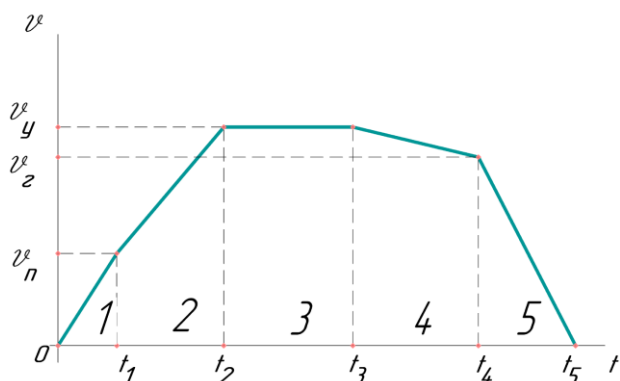


Рисунок 10 – Узагальнена діаграма руху

На рисунку 10 показано наступні фази:

– на етапі 1, що відноситься до фази розгону і є пусковим етапом, за проміжок часу від 0 до  $t_1$  засіб транспорту набирає швидкість до величини  $v_n$ ;

– на етапі 2 за проміжок часу від  $t_1$  до  $t_2$  засіб транспорту набирає швидкість до величини швидкості усталеного руху  $v_y$ ;

– на етапі 3 за проміжок часу від  $t_2$  до  $t_3$  засіб транспорту рухається з постійною швидкістю усталеного руху  $v_y$ ;

– на етапі 4 за проміжок часу від  $t_3$  до  $t_4$  засіб транспорту рухається в режимі вибігу.

При цьому швидкість зменшується до певної величини швидкості  $v_z$ , з якої почнеться використання засобів гальмування;

– на етапі 5 засіб транспорту за проміжок часу від  $t_4$  до  $t_5$  повністю зупиняється.

Після завершення етапу гальмування відбувається зупинка.

Виходячи з наведених міркувань розділено рух на фази:

– рух з максимальним прискоренням в зоні малих швидкостей;

– рух зі збільшенням відбору потужності від дизеля та збільшенням швидкості;

– рух в зона максимального відбору потужності від дизеля та подальшим збільшенням швидкості.

Далі проаналізовано способи керування тяговим перетворювачем частоти для забезпечення встановлених вимог руху на кожній з фаз.

В даному розділі вперше запропоновано концепцію побудови інформаційно-керуючої системи дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу в динамічних режимах на основі поєднання методів використання ройового інтелекту, нейронних мереж, гнучких кінематичних траєкторій та принципів термінального керування, що дозволяє реалізовувати необхідні види алгоритмів керування з урахуванням специфіки роботи транспортних систем, дозволяє враховувати всі фазові кінематичні обмеження, долати відхилення від основної кривої руху та забезпечити підвищення рівня енергоефективності енергетичної установки.

Система керування дизель-генераторною системою транспортного засобу в динамічних режимах побудована на основі інтелектуальної керуючої системи. Такий підхід дозволив отримувати необхідні динамічні властивості системи в автоматичному режимі з максимальною швидкістю без необхідності втручання оператора в процес визначення динамічних параметрів під час безпосередньої роботи. Встановлено вимоги до функціонування системи керування дизель-генераторною енергетичною системою транспортного засобу в динамічних режимах:

– система повинна реалізовувати встановлені параметри роботи в залежності від завдання оператора з урахуванням дозволених показників швидкості, прискорення та ривка;

– при реалізації завдання оператора система повинна обрати такий режим роботи кожної декомпонованої групи енергетичної установки, за якого повний ККД енергетичної установки є найбільш можливим;

– пріоритетним режимом роботи дизельного двигуна є режим роботи на економічній характеристиці;

– встановимо припущення про ймовірну можливість відхилення від графіка руху або роботи, що накладає на систему необхідність динамічної корекції показників роботи транспортного засобу задля досягнення встановленого графіка руху або роботи. Проте навіть за реалізації таких режимів динамічної корекції показників руху система повинна знаходити режим роботи з найменшими можливими втратами та найменшим споживанням дизельного палива.

Проектування системи керування для забезпечення необхідного зв'язку між параметрами тягової динаміки та необхідними для цього характеристиками енергетичної установки пропонується виконувати з використанням стахостично-еврестичних методів, що імітують поведінку, до яких відноситься відомий метод рою часток (PSO). Реалізацію підсистеми урахування дозволених показників швидкості, прискорення та ривка, за яких система керування повинна обрати такий режим роботи кожної декомпозованої групи енергетичної установки, коли повний ККД енергетичної установки є найбільш можливим з пріоритетним режимом роботи дизельного двигуна на економічній характеристиці виконано на основі нейронної мережі. Для урахування встановленого припущення про ймовірну можливість відхилення від графіка руху або роботи розроблено підсистему динамічної корекції показників роботи транспортного засобу задля досягнення встановленого графіка руху або роботи. В основу даної підсистеми положено використання принципів термінального керування, що дозволяє здійснити виконання найбільш раціональної кривої руху. Також в основу роботи підсистеми динамічної корекції показників роботи транспортного засобу задля досягнення встановленого графіка руху або роботи положено використання концепції гнучких кінематичних траєкторій.

Функціональну схему системи керування дизель-генераторною енергетичною установкою транспортного засобу в перехідних режимах представимо на рисунку 11.

На рисунку 11 позначено: КМ – командоконтролер машиніста; СК – система керування;

НМ – нейронна мережа; 1 ГД – перша група декомпозиції (тяговий двигун – редуктор – рушій); 2 ГД – друга група декомпозиції (перетворювач – тяговий двигун);

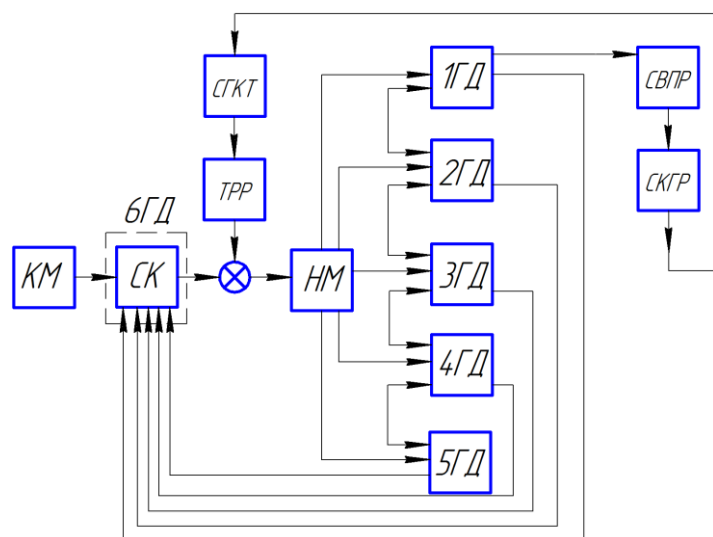


Рисунок 11 – Функціональна схема системи керування дизель-генераторною енергетичною установкою транспортного засобу в перехідних режимах

Система керування працюватиме наступним чином. Командоконтролер машиніста КМ генерує вихідний сигнал на завдання руху, який може бути представлено або у формі завдання на швидкість (що є характерним для водної та колісної техніки) або у формі завдання на силу тяги (що є характерним для залізничної техніки). Даний сигнал потрапляє на вхід системи керування СК. Система керування СК на своєму виході генерує базовий набір керуючих сигналів, який складається з рівня подачі палива паливним насосом до дизеля, завдання на збудження синхронного генератора, значення завдання на швидкість обертання ротора тягового двигуна та коефіцієнта модуляції для автономного інвертора напруги. Даний набір керуючих сигналів подається на вхід блоку нейронної мережі НМ. В блоці нейронної мережі НМ обирається такий режим роботи кожної декомпозованої групи енергетичної установки, за якого повний ККД частини є найбільш можливим, при цьому вважаючи пріоритетним режимом роботи дизельного двигуна режим роботи на економічній характеристиці. В результаті такого вибору блок нейронної мережі на своєму виході формує скорегований набір керуючих сигналів, який складається зі

3 ГД – третя група декомпозиції (генератор – перетворювач);

4 ГД – четверта група декомпозиції (генератор – перетворювач – тяговий двигун);

5 ГД – п'ята група декомпозиції (дизель – генератор);

6 ГД – шоста група декомпозиції (загальна система керування всіма ланками та системою в цілому);

СВПР – система визначення параметрів руху;

СКГР – система корегування графіка руху (роботи);

СГКТ – система гнучких кінематичних траєкторій;

ТРР – термінальний регулятор руху.



вищує струм, який генерується тяговим електродвигуном під час руху на вибігу або рекуперативного гальмування, паралельно з двигуном через тяговий випрямляч підключається генератор. Заряд накопичувальної системи від синхронного генератора дозволяє досягти рівномірності завантаження останнього, тим самим уникаючи необхідності зміни обертів дизеля при зміні навантаження на валу тягового двигуна – при зменшенні навантаження дизель продовжує працювати у майже сталому режимі на економічній характеристиці на накопичувальну систему, що дозволяє суттєво зменшувати витрати палива.

У випадку якщо в дизель-генераторній системі немає достатнього запасу потужності, частота обертання колінчатого вала дизеля продовжує знижуватися. Регулятор дизеля починає збільшувати подачу палива в циліндри дизеля. У певний момент, коли потужності дизеля буде достатньою, щоб забезпечити певне навантаження, відбувається різке збільшення частоти обертання колінчатого вала дизеля, при цьому система керування зменшує струм збудження тягового генератора, сприяючи ще більшому збільшенню частоти обертання колінчатого вала дизеля.

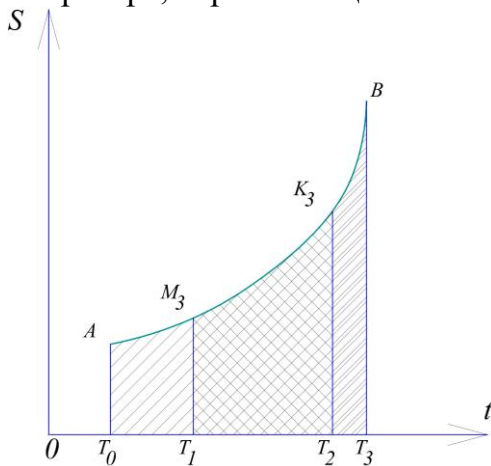


Рисунок 13 – Схема до пояснення площі під графіком  $S = S(t)$  в різних випадках нахилу даної кривої відносно осі абсцис

Також в даному розділі показано вплив критерію мінімізації площі під кривою руху дизель-генераторного транспортного засобу на мінімізацію тягової роботи з переміщення одиниці транспортного засобу. Сформулюємо даний критерій у вигляді теореми: управління рухом транспортного засобу, за якого виконується мінімізація площі під кривою руху транспортного засобу (залежність пройденого шляху від часу) при існуванні обмежень на максимальні величини кінематичних характеристик руху (швидкість, прискорення, ривок) призводить до мінімізації тягової роботи з переміщення одиниці транспортного засобу з однієї точки на кривій руху до іншої. Суть зазначеного критерію полягає в одержанні мінімальної площі під кривою руху, що визначає мінімальне значення виконуваної роботи (рисунок 13).

У п'ятому розділі «Аналіз резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху» проаналізовано енергетичні резерви дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу для здійснення процесу накопичення енергії в умовах коротких дистанцій шляху, що дозволяє отримати інформацію про період роботи енергетичної установки, коли потрібно використовувати накопичувач енергії. Це дозволяє здійснювати раціональний розподіл енергетичних потоків між забезпеченням тягового процесу, функціонуванням системи власних потреб, системи забезпечення комфорту та накопиченням енергії та визначати режими роботи декомпованих груп енергетичної установки при застосуванні електричного гальмування, чим забезпечується раціональний режим роботи дизель-генераторної установки за умови роботи на економічній характеристиці з використанням енергії накопичення.

Виконано аналіз накопичувачів енергії для довготривалих (статичних) та повторно-короткочасних (динамічних) режимів роботи. В результаті показано, що в якості накопичувача енергії варто використовувати ємнісний накопичувач на основі модулів електрохімічних конденсаторів – суперконденсаторів. В якості альтернативи суперконденсаторам можна застосовувати акумуляторні батареї (NiMH або LiIon), що мають істотно більшу питому енергію. Проте, їх застосування пов'язано з обмеженням режимів заряду і розряду, а головне – вони як мінімум удвічі поступаються суперконденсаторам по ресурсу.

Показано, що для накопичувальної системи трактора 5 класу буде достатнім встановлення накопичувача ємністю 15,8 Ф. Маса такої конденсаторної установки складатиме 87 кг і дозволить забезпечити повністю автономне переміщення трактора на шлях 1,132 км. Використання

цього ж накопичувача для стартерного пуску дозволяє зменшити номінальну ємність акумуляторної батареї на 47% в порівнянні зі стандартною батареєю (ємність 215 А·год) за умов повного розряду акумулятора.

Далі досліджено електромагнітні процеси самозбудження асинхронного тягового двигуна при гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності (дизеля). Розглянуто умови збудження асинхронної машини в гальмівному режимі при включенні гальмівного резистору у ланку постійного струму. Показано, що доцільно при гальмівному режимі тримати випрямляч в закритому стані шляхом зниження збудження синхронного генератора так, щоб випрямлена напруга останнього була нижче випрямленої напруги асинхронної машини. При низьких коефіцієнтах потужності може виявитись доцільним ввімкнення випрямляча та живлення асинхронної машини від синхронного генератора шляхом збільшення його збудження.

У шостому розділі «Апробація методології підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту» показано, що перевірка правильності вирішення прикладної практичної проблеми та відповідної їй науково-прикладної проблеми складається з підтвердження адекватності та правильності отриманої моделі для дослідження процесів підвищення енергетичної ефективності, розробленої на основі запропонованої в дисертаційній роботі методології, реальним фізичним процесам, які відбуваються в дизель-генераторних енергетичних установках змінного струму для транспортних засобів (валідація), та підтвердження її переваг (верифікація). Для підтвердження адекватності та правильності розробленої методології реальним фізичним процесам, які відбуваються в дизель-генераторних енергетичних установках змінного струму для транспортних засобів розглянемо ряд експериментальних польових дослідів, результати яких порівнюємо з результатами моделювання. Для всіх послідовних дослідів визначимо наступний перелік загальних положень. Предметом дослідження є підтвердження закономірностей між параметрами режимів роботи дизель-генераторних енергетичних систем та показниками енергоефективності з урахуванням взаємозв'язків між елементами системи. Об'єкти вимірювань: величина активного струму в ланці постійного струму енергетичної установки; величина швидкості руху. Об'єкти розрахунку: прискорення; крива руху; ривок. Точність вимірювання – дві значущі цифри після коми. Значення параметрів визначаються в п'яти повтореннях, а отримані результати обробляються методом варіаційної статистики. Максимальні відхилення вимірюваних величин складають: величина активного струму в ланці постійного струму енергетичної установки  $\pm 1\%$ ; величина швидкості руху  $\pm 5\%$ . Проведено дослід з визначення комплексу показників роботи дизель-електричного трактору (тяговий клас - 5), що характеризують процес загінної оранки в суху погоду (по сухому ґрунту).

Відповідні регистриграми та результати моделювання показано на рисунках 14 – 18.

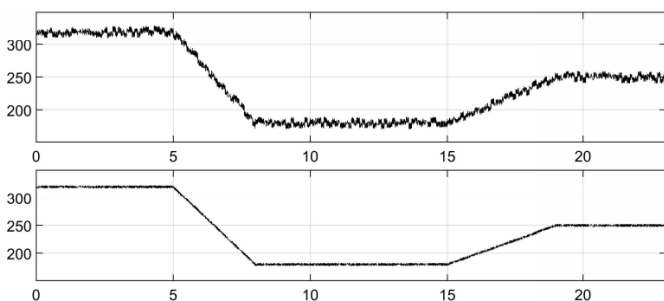


Рисунок 14 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) активного струму в ланці постійного струму перетворювача частоти (вісь абсцис в амперах, вісь ординат в секундах)

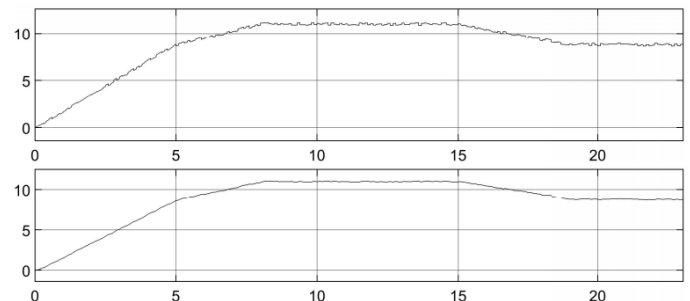


Рисунок 15 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) швидкості руху (вісь абсцис в км/год., вісь ординат в секундах)

Мета досліджу – визначення значень кінематичних показників та показників роботи енергетичної установки під час виконання загінної оранки в суху погоду (по сухому ґрунту). Об'єктом дослідження є кінематичні, енергетичні, електромеханічні та електромагнітні процеси роботи

дизель-електричного трактору під час виконання загінної оранки в суху погоду (по сухому ґрунту). Вихідні умови експерименту: трактор 5 тягового класу агрегатований з плугом ПНУ-8-40У (продуктивність до 3 га/год., ширина захвату 3.2 м, глибина оранки до 0.3 м, робоча швидкість до 12 км/год.); рівна ділянка поля (ухили до 2<sup>0</sup>) з довжиною гону 200 м; вологість ґрунту по шарам: 0-15 см: до 20%; 15-30 см: до 25%.

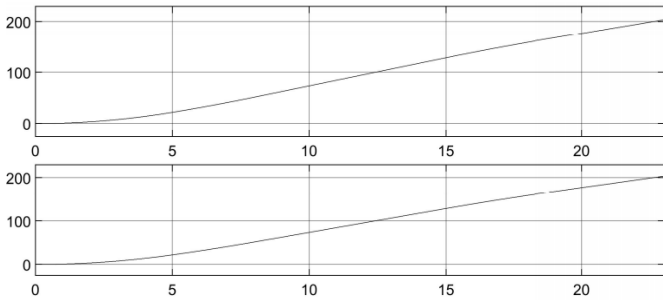


Рисунок 16 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) шляху (вісь абсцис в метрах, вісь ординат в секундах)

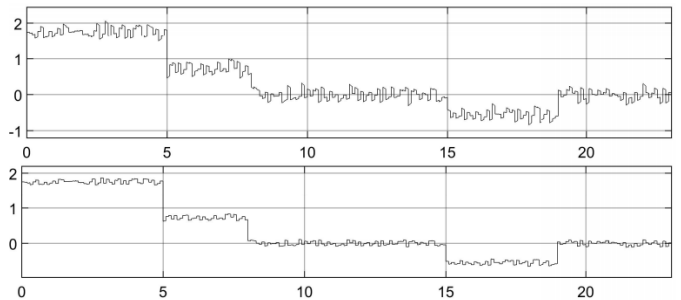


Рисунок 17 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) прискорення руху (вісь абсцис в м/с<sup>2</sup>, вісь ординат в секундах)

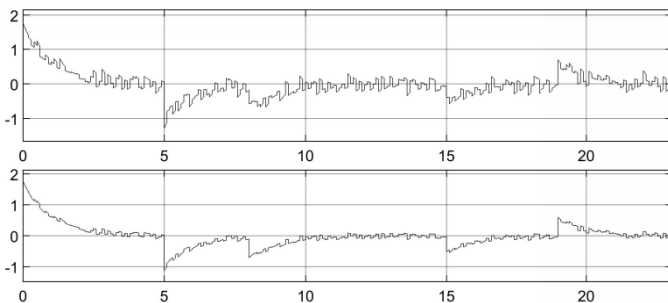


Рисунок 18 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) ривка під час руху (вісь абсцис в м/с<sup>3</sup>, вісь ординат в с.)

старіння резини та пружних матеріалів, явища зносу та інше), по-друге неоднорідністю ґрунту (в модель закладається однорідний ґрунт, а на практиці це є майже неможливим).

Проведено дослід з визначення комплексу показників роботи дизель-електричного трактору (тяговий клас - 5), що характеризують процес загінної оранки поля після дощу (вологий ґрунт). Мета дослідження – визначення значень кінематичних показників та показників роботи енергетичної установки під час виконання загінної оранки поля після дощу (вологий ґрунт).

Відповідні регистрограми та результати моделювання показано на рисунках 19 – 23.

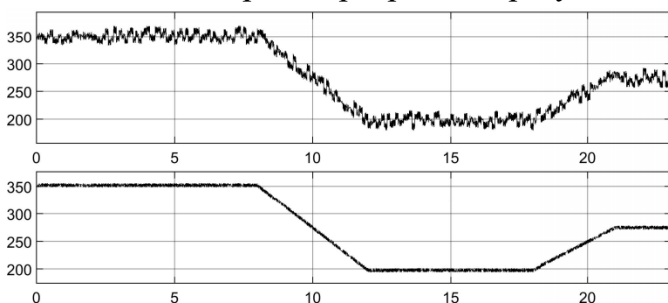


Рисунок 19 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) активного струму в ланці постійного струму перетворювача частоти (вісь абсцис в амперах, вісь ординат в секундах)

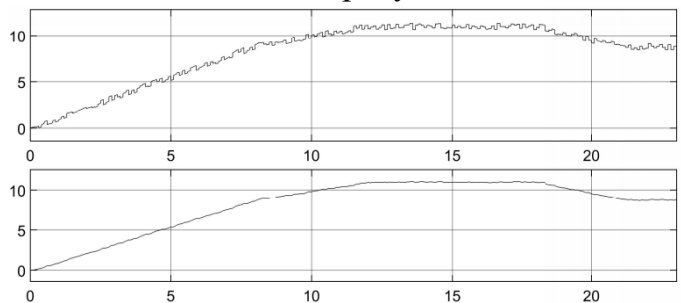


Рисунок 20 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) швидкості руху (вісь абсцис в км/год., вісь ординат в секундах)

Об'єктом дослідження є кінематичні, енергетичні, електромеханічні та електромагнітні

процеси роботи дизель-електричного трактору під час виконання загінної оранки поля після дощу (вологий ґрунт). Вихідні умови експерименту: рівна ділянка поля (ухили до  $2^0$ ) після опадів; вологість ґрунту по шарах: 0-15 см: від 50%; 15-30 см: від 60%, довжина гону 200 м.

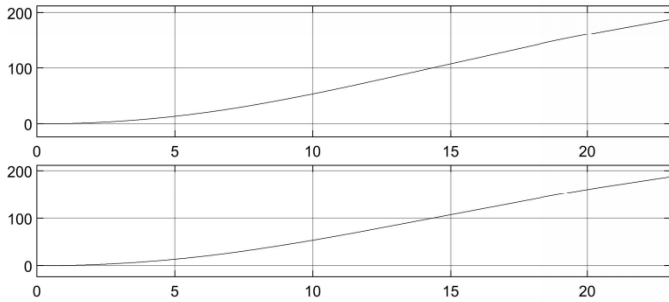


Рисунок 21 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) шляху (вісь абсцис в метрах, вісь ординат в секундах)

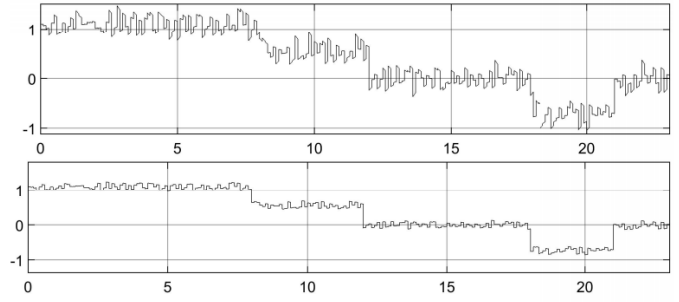


Рисунок 22 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) прискорення руху (вісь абсцис в  $\text{м/с}^2$ , вісь ординат в секундах)

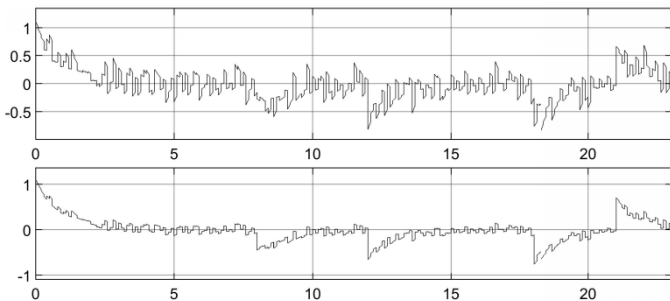


Рисунок 23 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) ривка під час руху (вісь абсцис в  $\text{м/с}^3$ , вісь ординат в с.)

Мета досліджу – визначення значень кінематичних показників та показників роботи енергетичної установки під час руху по асфальтованому шосе в спорядженому стані.

Об'єктом дослідження є кінематичні, енергетичні, електромеханічні та електромагнітні процеси роботи дизель-електричного трактору під час руху по асфальтованому шосе в спорядженому стані.

Вихідні умови експерименту:

- трактор 5 тягового класу з причепом масою 40000 кг;
- рівна ділянка асфальтованого шосе без ухилів довжиною 1200 м.

Відповідні регистрограми та результати моделювання показано на рисунках 24 – 28.

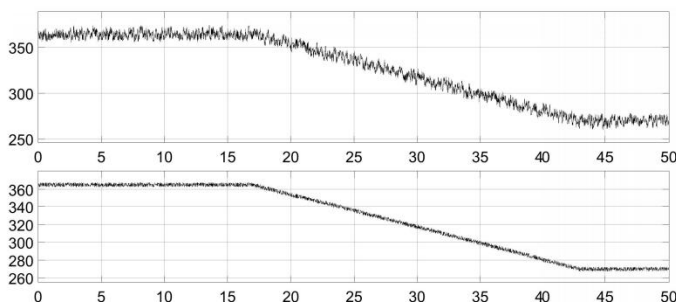


Рисунок 24 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) активного струму в ланці постійного струму перетворювача частоти (вісь абсцис в амперах, вісь ординат в секундах)

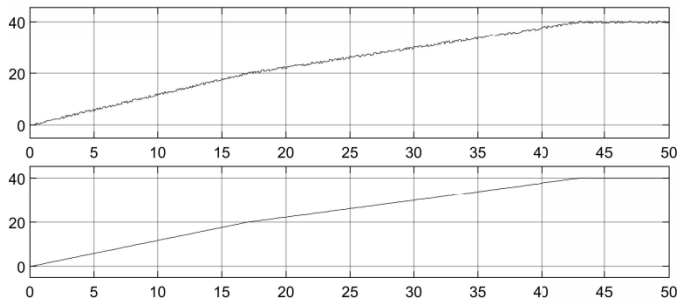


Рисунок 25 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) швидкості руху (вісь абсцис в  $\text{км/год.}$ , вісь ординат в секундах) в  $\text{км/год.}$ , вісь ординат в секундах)

Співставлення експериментальних польових даних та даних моделювання, дозволяє стверджувати про точність розроблених заходів, адже відносне відхилення складає від 1,27% до 6,53%.

Проведено дослід з визначення комплексу показників роботи дизель-електричного трактору (тяговий клас - 5), що характеризують процес руху по асфальтованому шосе в спорядженому стані.

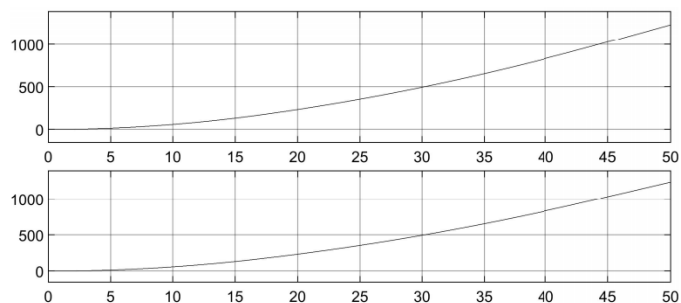


Рисунок 26 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) шляху (вісь абсцис в метрах, вісь ординат в секундах)

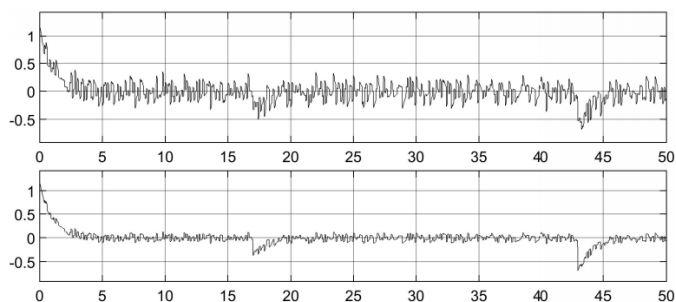


Рисунок 28 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) ривка під час руху (вісь абсцис в  $\text{м/с}^3$ , вісь ординат в секундах)

На ділянці площею 0,5 га вирішувалась задача ліквідації відставання від графіка загінної оранки. Додатково було вирішено задачу з іншим рівнем обмеження швидкості – для ділянки 0,25 га було встановлено менший рівень припустимої швидкості загінної оранки. Основні параметри, що характеризують показники загінної оранки трактором наведено в таблиці 7.

Таблиця 7 – Вихідні дані та результати моделювання загінної оранки

Параметр руху	Варіанти задач руху			
	1	2	3	
Площа ділянки оранки, га	0,25	0,25	0,5	
Нормативний час, хв.	17	21	34	
Швидкість ходу наприкінці ділянки, км/год.	9	6	9	
Обмеження на абсолютну величину прискорення, $\text{м/с}^2$	0.8			
Обмеження на абсолютну величину ривка, $\text{м/с}^3$	2			
Витрати дизельного пального, кг	Алгоритм 1	34.63	36.31	54.27
	Алгоритм 2	31.54	34.12	49.86
	Алгоритм 3	35.54	37.81	57.11
Фактичний час ходу, хв.	Алгоритм 1	18	22	35
	Алгоритм 2	24	26	38
	Алгоритм 3	16	20	34

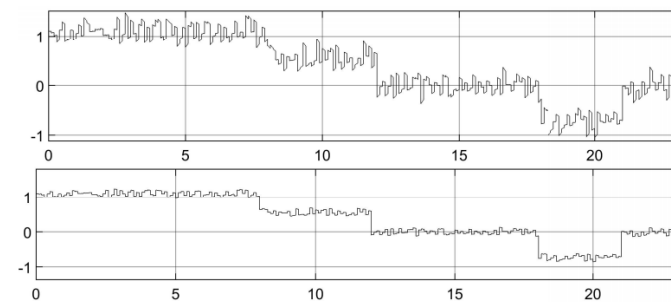


Рисунок 27 – Регистрограма (вгорі) та результати моделювання (знизу) прискорення руху (вісь абсцис в  $\text{м/с}^2$ , вісь ординат в секундах)

Співставлення експериментальних польових даних та результатів моделювання, дозволяє стверджувати про точність розроблених заходів, адже відносне відхилення складає від 1,05% до 7,41%.

Для проведення аналізу витрат палива та відповідності встановленому графіку руху або роботи було прийнято для моделювання дві довільні ділянки площею 0,25 га та 0,5 га відповідно, на яких необхідно провести загінну оранку цілини на повністю спорядженому тракторі 5 класу.

В таблиці 7 введено наступні скорочення: алгоритм 1 – керування з використанням методології, розробленої в роботі; алгоритм 2 – алгоритм керування за принципом мінімізації витрат пального без використання принципу максимізації динамічного ККД та керування декомпозованими групами; алгоритм 3 – алгоритм керування за принципом мінімізації часу виконання оранки без використання принципу максимізації загального динамічного ККД та керування декомпозованими групами.

Таким чином, виходячи з аналізу даних таблиці 7, приходимо до наступних висновків:

- введення обмежень на швидкість, що встановлюється на шляху для всіх алгоритмів керування призводить до збільшення часу ходу та витрат пального;
- співставлення витрат пального показує, що при вирішенні задачі мінімізації часу ходу витрати пального в порівнянні з базовим алгоритмом збільшуються на 2.63 %, проте при використанні алгоритму мінімізації витрат палива даний параметр зменшується на 8.93 %;
- при вирішенні задачі мінімізації часу ходу витрати пального в порівнянні з базовим алгоритмом збільшуються на 4.13 %, проте при використанні алгоритму мінімізації витрат палива даний параметр зменшується на 6.04 %.
- при вирішенні задачі мінімізації часу ходу витрати пального в порівнянні з базовим алгоритмом збільшуються на 5.23 %, проте при використанні алгоритму мінімізації витрат палива даний параметр зменшується на 8.13 %.

На основі розробленої математичної моделі для варіанту руху трактору було встановлено співвідношення витрат палива в режимі холостого ходу та режимі тяги в умовному експлуатаційному циклі оранки задачі руху 1 з таблиці 7, яке складає 4,73. Оскільки експлуатаційний цикл демонструє технологічно обґрунтовані витрати часу та палива на виконання певної роботи, то обирати дане співвідношення більшим, ніж отримане, не має практичного сенсу.

Покажемо також графіки питомої витрати палива для порівнюваних алгоритмів керування (рисунок 29). Наведені на рисунку 29 графіки ілюструють, що алгоритм, який відповідає розробленій в дисертаційній роботі методології підвищення енергетичної ефективності, забезпечує паливну економічність на прикладі даного трактору на рівні до 6,7% в залежності від використовуваної потужності. З огляду на, що середнє річне завантаження трактора тягового класу 5 дорівнює 75,7%, ймовірна паливна економія при використанні розробленої методології буде отримана на рівні до 5,1% в порівнянні з серійним аналогом.

Покажемо графіки питомої витрати палива теоретичного значення розробленого алгоритму керування та його практичної реалізації (рисунок 30). Відповідно до даних рисунку 30 відхилення питомої витрати палива теоретичного значення розробленого алгоритму керування та його практичної реалізації складає до 3,4%.

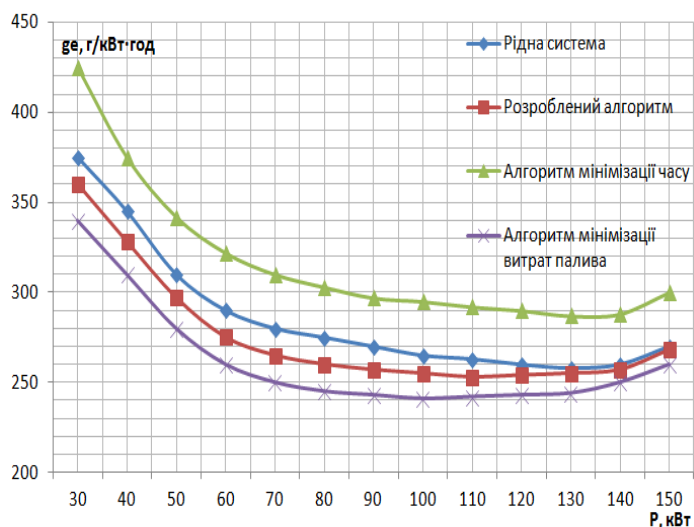


Рисунок 29 – Графіки питомої витрати палива для порівнюваних алгоритмів керування

Запропоновано поліноми для функцій шляху, швидкості, прискорення та ривка дають точні значення при використанні для систем керування позаміського транспорту, де режими руху є відносно сталими та прогнозованими. Проте під час планування маршрутів міського транспорту точне прогнозування режимів руху в часі є надто складним через низку передбачуваних моментів, які створюють не прогнозовану картину графіка залежності швидкості від часу (про що красномовно свідчать типові графіки циклів NEDC, ECE 15, EUDC, FTP-75). Для складних за формою графіків з ділянками зростання та спадання, які по чергово слідуєть одна за одною з невідомою частотою високої точності в апроксимації та математичному описі можна досягти за допомогою

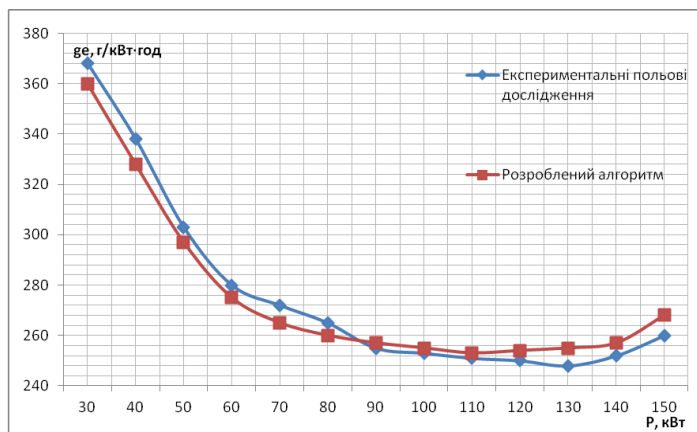


Рисунок 30 – Графіки питомої витрати палива теоретичного значення розробленого алгоритму керування та його практичної реалізації



Рисунок 31 – Експериментальне підтвердження отриманих залежностей під час транспортного руху трактора тягового класу 5 в спорядженому стані

Таблиця 8 – Комплекс показників роботи системи керування дизель-електричного трактору без декомпозиції, та з різними варіантами декомпозиції

Варіанти комбінацій груп декомповованої структури	Спектральний радіус ітеративної матриці різницевої схеми	Коефіцієнт трудомісткості інтегрування від рівня декомпозиції	Час декомпозиції, с	Повний час моделювання циклу роботи системи, с	ККД, %
Без декомпозиції	4	6,37	0	11,28	19,25
Автоматичний вибір	2,3	5,14	2,54	19,37	26,15
Групи 1-2-3-4-5-6	0,85	3,25	0	14,12	25,43
Групи 1-2-4-5-6	0,8	4,18	0	14,03	23,15
Групи 1-3-5-6	2	3,95	0	13,29	22,87
Групи 1-2-5-6	6	5,13	0	13,47	21,16
Групи 4-5-6	3,75	6,98	0	12,55	20,06
Групи 2-3-5-6	2,5	5,74	0	12,89	20,47

З аналізу таблиці 8 видно, що використання різних прийомів декомпозиції призводить до збільшення ККД системи в порівнянні з керуванням недекомповованою структурою. Проте, при цьому збільшується час моделювання циклу системи керування. З огляду на високу частоту ро-

використання багаточленів Чебишова.

Проведено експериментальне підтвердження отриманих залежностей під час транспортного руху трактора тягового класу 5 в спорядженому стані в їздовому циклі NEDC. Відповідний графік руху показано на рисунку 31. Відхилення швидкості складає до 6,38%.

Виконано оцінку різних варіантів запропонованої декомпозиції на комплекс показників роботи системи керування дизель-генераторною енергетичною установкою дизель-електричного трактору (результати порівняння зведено до таблиці 8).

боти сучасних процесорів збільшення часу роботи системи керування є не значним поступом перед можливістю приросту коефіцієнту корисної дії на 6,18%. Окрім того, при використанні запропонованої схеми декомпозиції на 6 груп спектральний радіус ітеративної матриці різницевої схеми стає меншим 1, що забезпечує стійкість отриманої системи та сходження до розв'язку матриці системи, а отже наявність оптимального рішення для запропонованого варіанту декомпозиції. При цьому коефіцієнт трудомісткості інтегрування від рівня декомпозиції для запропонованого варіанту є також оптимальним з поміж отриманих.

Окремо варто проаналізувати варіант з автоматичним вибором декомповованої структури в процесі роботи. Він хоча і забезпечує незначний приріст в ККД до 0,72% в порівнянні із запропонованим варіантом декомпозиції, проте при цьому потребує на 55% більше часу на виконання процесу моделювання і декомпозиції, а й отже значно завантажить процесор системи керування, що є не прийнятним з огляду на співвідношення показників приросту ККД та приросту часу моделювання при цьому.

Надамо узагальнення приросту ККД за категоріями потужності для визначених умов роботи дизель-електричного трактору в таблиці 9. Для порівняння оберемо типовий трактор потужністю 50 кВт (для I тягової категорії), 150 кВт (для II тягової категорії) та 390 кВт (для III тягової категорії).

Таблиця 9 – Приріст ККД за категоріями потужності

Характерний режим роботи	Категорія потужності		
	I	II	III
Цикл NEDC	+12,07 %	+13,28 %	+13,53 %
Цикл ECE 15	+10,03 %	+10,87 %	+10,91 %
Цикл EUDC	+9,72 %	+10,1 %	+10,29 %
Цикл FTP-75	+14,10 %	+15,24 %	+15,66 %

Виконаємо оцінку різних варіантів запропонованої декомпозиції на комплекс показників роботи системи керування дизель-генераторною енергетичною установкою дизель-поїзду ДЕЛ-02. Для цього за методикою аналогічно до оцінки трактора оцінимо той самий комплекс показників роботи системи (таблиця 10).

Таблиця 10 – Комплекс показників роботи системи керування дизель-поїзду без декомпозиції, та з різними варіантами декомпозиції

Варіанти комбінацій груп декомповованої структури	Спектральний радіус ітеративної матриці різницевої схеми декомпозиції	Коефіцієнт трудомісткості інтегрування від рівня декомпозиції	Час декомпозиції, с	Повний час моделювання циклу роботи системи керування, с	ККД, %
Без декомпозиції	4,75	6,8	0	12,15	21,15
Автоматичний вибір структури	1,98	4,87	3,22	21,05	27,18
Групи 1-2-3-4-5-6	0,91	2,8	0	15,4	26,69
Групи 1-2-4-5-6	0,72	3,95	0	14,8	25,21
Групи 1-3-5-6	3,1	2,15	0	14,11	24,38
Групи 1-2-5-6	7,2	4,7	0	14,05	23,19
Групи 4-5-6	3,2	7,26	0	13,78	22,04
Групи 2-3-5-6	2,1	5,15	0	13,14	21,43

З таблиці 10 видно, що використання різних прийомів декомпозиції аналогічно призводить до збільшення ККД системи в порівнянні з керуванням недекомповованою структурою. Також при використанні запропонованої схеми декомпозиції на 6 груп спектральний радіус ітеративної матриці різницевої схеми стає меншим 1, що забезпечує стійкість отриманої системи та сходження до розв'язку матриці системи, а отже наявність оптимального рішення для запропонованого варіанту декомпозиції. При цьому коефіцієнт трудомісткості інтегрування від рівня де-

композиції для запропонованого варіанту є також оптимальним. Надамо узагальнення приросту ККД за категоріями потужності для визначених умов роботи залізничного транспорту в таблиці 11. Для порівняння розглянемо маршрут Христинівка - Вапнярка.

Таблиця 11 – Приріст ККД за категоріями потужності

Характерний режим роботи	Категорія потужності		
	I	II	III
Приміський рух (всі зупинки)	+10,72 %	+12,09 %	+13,11 %
Магістральний рух (без повних зупинок)	+5,24 %	+6,21 %	+6,54%

Відповідні параметри руху з дизель-поїзда ДЕЛ-02 показано на рисунку 32.



Рисунок 32 – Режимні параметри руху з монітора машиніста дизель-поїзда ДЕЛ-02

Отже, результати проведених експериментів та моделювання дозволяють стверджувати, що поставлена у роботі мета є досягнутою.

## ВИСНОВКИ

Наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати у галузі електричної інженерії в сукупності вносять вклад у розв'язок важливої **науково-прикладної проблеми** галузі – розвитку наукових основ зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, в основі якої лежить недовикористання енергетичного потенціалу дизель-генераторних систем, а також **практичної проблеми** – зниження енергетичних витрат транспортної галузі. В результаті проведення досліджень **підтверджена наукова гіпотеза** – встановлено, що у дизель-генераторних енергетичних установках засобів транспорту максимальний потенціал енергозбереження в декомпованій системі досягається використанням схем зі змінною структурою і відповідних алгоритмів керування, за яких кожен силовий елемент декомпованої структури своїм режимом роботи має досягти мінімального рівня втрат енергії у всій дизель-генераторній системі в цілому. Задачу загального керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку варіантів найбільш енергоефективної схеми змінної структури, законів та алгоритмів взаємодії між компонентами даної змінної структури, за яких досягаються всі робочі характеристики транспортного засобу.

В результаті отримано наступні наукові та практичні результати:

1. В результаті проведеної **декомпозиції дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту і розробки та аналізу математичної моделі декомпованої структури** сформульовано критерії та ознаки декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки. На основі цього виконано декомпозицію, узагальнення та класифікацію декомпованих груп дизель-генераторної енергетичної установки. Зокрема, виділено групи елементів, які чинять значний вплив на рівень втрат (ККД, енергетичний потенціал). Показано, що запропоновані структури декомпованих груп охоплюють всі основні категорії транспортних енергетичних установок по тяговим класам, для яких властиві ті чи інші уніфіковані структури, взаємозв'язок між якими дозволяє максимально підвищувати рівень енергоефективності всієї енергетичної установки. Також дістав подальшого розвитку метод математичного описання компонентів енергетичних установок в рамках якого розроблена загальна математична модель дизель-генераторної енергетичної установки, адекватної усталеному та перехідному режимам роботи в

усьому діапазоні можливих навантажень і здатної до швидкої перебудови при зміні конструкції системи (отримання системи зі змінною структурою), а також при зміні режиму роботи.

2. Під час дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в усталених режимах роботи показано, що розрахунок максимальної величини статичного ККД послідовно з'єднаних елементів енергетичної установки як добутку величин максимального ККД окремих елементів в загальному випадку дає невірне значення, адже точки максимуму функцій статичного ККД не досягаються при одній і тій самій потужності одночасно для кожного елемента системи.

Показано, що концепція підвищення енергоефективності дизель-генераторної системи транспортного засобу базується на тому, що у такій системі кожен силовий елемент декомпозованої структури призначені максимізувати свої техніко-економічні показники, компенсуючи при цьому недоліки один одного, та підвищити енергетичний потенціал всієї дизель-генераторної системи.

Запропоновано метод підвищення енергоефективності дизель-генераторної системи транспортного засобу за статичними характеристиками шляхом вибору таких елементів декомпозованої структури, у яких точка екстремуму функції статичного ККД лежить в мінімальному околі точки екстремуму кривої статичного ККД дизельного двигуна, що дозволяє отримати максимальну величину статичного ККД всієї структури для повного використання енергетичного потенціалу системи.

Виконано аналіз взаємного впливу груп декомпозованої структури на підвищення енергетичного потенціалу за статичними характеристиками, в ході якого показано вплив кожної підсистеми та їх взаємного зв'язку системи на загальний рівень питомого рівня споживання палива та статичного ККД системи.

Визначено, сукупне підвищення статичного ККД енергетичної установки може сягати до 5% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 7% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт) та до 8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт).

3. В результаті дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в перехідних режимах роботи виділено ряд основних факторів, від яких залежить динамічний ККД енергетичної установки та визначено, що сукупне підвищення динамічного ККД системи може сягати до 4,6% (для I групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 6,8% (для II групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт) та до 7,8% (для III групи з типовою потужністю понад 300 кВт).

Проаналізовано керування дизель-генераторною системою на коротких дистанціях руху в наслідок чого встановлено та обґрунтовано послідовність керування перетворювачем частоти в залежності від фаз руху.

Дістала подальшого розвитку концепція гнучких кінематичних траєкторій для виконання термінального алгоритму енергоощадного керування декомпозованими групами, зокрема, поширено дану концепцію на новий клас систем – адаптовано принципи даної концепції до використання в дизель-генераторних транспортних засобах з дизель-генераторними енергетичними установками.

Запропоновано метод синтезу інформаційно-керуючої системи для керування декомпозованими групами енергетичної установки з використанням систем ройового інтелекту та нейронної мережі.

Виконано аналіз взаємного впливу груп декомпозованої структури на підвищення енергетичного потенціалу за динамічними характеристиками, в ході якого показано вплив кожної підсистеми та їх взаємного зв'язку системи на загальний рівень динамічного ККД системи.

4. Під час проведення аналізу резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху проаналізовано енергетичні резерви дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу для здійснення процесу накопичення енергії в умовах коротких дистанцій шляху.

Виконано аналіз накопичувачів енергії для довготривалих (усталених, статичних) та повторно-короткочасних (перехідних, динамічних) режимів роботи. В результаті показано, що в якості накопичувача енергії варто використовувати ємнісний накопичувач на основі модулів електрохімічних конденсаторів – суперконденсаторів. Показано, що для системи трактора 5 тягового класу використання накопичувача для стартерного пуску дозволяє зменшити номінальну ємність акумуляторної батареї на 47% в порівнянні зі стандартною батареєю (ємність 215 А·год) за умов повного розряду акумулятора. Також проведено дослідження паливної характеристики дизель-генераторної установки трактора 5 тягового класу при заряді накопичувального пристрою тільки від тягового двигуна та подальшому розряді в систему електропостачання, в результаті чого відмічено зменшення витрат палива до 4,94 % в порівнянні із базовою конструкцією трактора. Аналогічно досліджена паливна характеристика дизель-генераторної установки при комбінованому заряді накопичувального пристрою від генератора та тягового двигуна та подальшому розряді в систему електропостачання, в результаті чого відмічено зменшення витрат палива до 6% в порівнянні із базовою конструкцією трактора.

5. Проведена **апробація методології підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту** показала, що співставлення експериментальних польових даних та даних моделювання під час проведених дослідів з визначення значень кінематичних показників та показників роботи електромеханічної системи трактору 5 класу під час виконання загінної оранки в суху погоду (по сухому ґрунту), під час виконання загінної оранки поля після дощу (вологий ґрунт) та під час руху по асфальтованому шосе в спорядженому стані, дозволяє стверджувати про точність розроблених заходів, адже відносне відхилення складає від 0,98% до 7,41%, що відповідає вимогам ГОСТ 8.010-99 ГСИ. «Методики выполнения измерений. Основные положения» та ДСТУ ГОСТ ИСО 5725-1:2005 «Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювань. Частина 1. Основні положення та визначення». При цьому встановлено, що алгоритм, який відповідає розроблений в дисертаційній роботі методології підвищення енергетичної ефективності, забезпечує паливну економічність на прикладі трактору 5 класу на рівні до 6,7% в залежності від використовуваної потужності. З огляду на, що середнє річне завантаження трактора тягового класу 5 дорівнює 75,7%, ймовірна паливна економія при використанні розробленої методології буде отримана на рівні до 5,1% в порівнянні з серійним аналогом.

Також показано метод підвищення точності забезпечення встановлених динамічних параметрів руху використанням багаточленів Чебишова, що дозволило на основі типових графіків їздових циклів NEDC, ECE 15, EUDC, FTP-75, High Speed (US06) Driving Cycle отримати величину максимальної похибки описання тестових їздових циклів на рівні до 2,1 %. Для практичного використання обчислення коефіцієнтів розкладення функції за допомогою використання багаточленів Чебишова першого роду описано рекурентний алгоритм обчислення коефіцієнтів за допомогою мови С.

Отже, наведене свідчить про те, що поставлена мета роботи, яка полягала у підвищенні енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок транспортних засобів є досягнутою.

Співпадіння результатів математичного і імітаційного моделювання енергетичних, електромеханічних та електромагнітних процесів, отриманих в роботі та даних експериментальних польових досліджень дозволяють рекомендувати розповсюдження результатів роботи на аналогічні дизель-генераторні енергетичні установки транспортних засобів для підвищення рівня реалізації їх енергетичного потенціалу.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Механизация, автоматизация, информатизация, телекоммуникация и связь в отраслях производств : коллективная монография / Д. А. Кулагин и др. ; . Новосибирск : Изд-во «Си-

- БАК», 2014. 156 с. *Здобувачем проведено аналіз раціональних способів керування тяговою електропередачею електрорухомого складу в пункті 1.1, написані пункти 1.2, 1.3.*
2. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія. Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. 154 с.
3. Інформаційні управляючі системи та технології : колективна монографія / Д. О. Кулагін та ін. Донецьк : Донбас, 2014. 218 с. *Здобувачем здійснено математичний аналіз задачі раціонального керування тяговим процесом та отримано рішення даної задачі в розділі 2.*
4. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: від теорії до практики: колективна монографія у 2т. Т.2. / за заг. ред. Савчук Л. М. Павлоград : АРТ Синтез-Т, 2014. 429 с. ISBN 978-617-7232-00-0 (повне вид.), ISBN 978-966-97393-9-1 (том 2). *Здобувачем здійснено математичний аналіз задачі синтезу інформаційно-керуючої системи для здійснення енергоощадної експлуатації рухомих електротехнічних комплексів та отримано рішення даної задачі в розділі 6.*
5. Современная наука обществу XXI века: коллективная монография / Д. А. Кулагин и др. Ставрополь : Логос, 2015. 280 с. ISBN 978-5-905519-13-0. *Здобувачем здійснено математичний аналіз задачі побудови енергоефективної системи керування рухомих електротехнічних комплексів та отримано рішення даної задачі в розділі 3.*
6. Кулагін Д. О. Интеграция экономических та технических процессов: современный стан та перспективи розвитку: колективна монографія / за заг. ред. Савчук Л. М. Х. : Вид-во «Діса плюс», 2015. 480 с. ISBN 978-617-7064-86-1. *Здобувачем здійснено постановку концепції вибору структури тягового електроприводу для побудови енергоефективної системи керування рухомих електротехнічних комплексів в розділі 5.*
7. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Дослідження роботи тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 при збуреннях в електричних колах. *Електротехніка та електроенергетика*. 2012. № 1. С. 30–34. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, встановлено характерні типи збурень у силових колах тягових електропередачі дизель-поїздів, визначено межі та порядок їх впливу на роботу системи електричної тяги.*
8. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Врахування дії пружних зв'язків та частин на роботу тягової електропередачі автономного локомотива. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2012. № 5(81). С. 16–21. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, створено математичну модель тягової електропередачі автономного локомотива, визначено математичні моделі пружних зв'язків.*
9. Кулагін Д. О. Розробка елементів системи керування тяговою електропередачею дизель-поїзда ДЕЛ-02. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 1/2012 (17). С. 77–80.
10. Кулагін Д. О. Розробка математичної моделі тягового перетворювача частоти дизель-поїзда. *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. 2012. № 2 (73). С. 96–99.
11. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д., Андрієнко Д. С. Аналіз режимів роботи модернізованої тягової електропередачі автономного локомотива. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 2/2012 (18) . С. 615–617. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, створено ієрархічну структуру тягової електропередачі автономного локомотива, проаналізовано характерні режими роботи створеної системи.*
12. Кулагін Д. О. Стан та тенденції розробки тягових передач дизельного рухомого складу залізниць. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 132–135.
13. Кулагін Д. О. Баланс потужностей рухомого складу в процесі рекуперації електричної енергії. *Вісник НТУ «ХП»*. 2013. № 36(1009). С. 392–393.
14. Кулагин Д. А. Определение энергетических резервов автономного моторвагонного подвижного состава для осуществления процесса рекуперации энергии. *Ползуновский вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова*. 2013. № 4. С. 54–58.

15. Кулагін Д. О. Спосіб апроксимації кривої намагнічування тягового асинхронного двигуна. *Електротехніка та електроенергетика*. 2013. №2. С. 66-70.
16. Кулагін Д. О. Особливості задачі раціонального керування модулем вектора потокозчеплення тягового асинхронного двигуна дизель-поїзда. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 2. С. 155–157.
17. Кулагін Д. О. Врахування впливу насичення магнітних кіл на механічні характеристики тягових асинхронних двигунів. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. № 1(43). С. 147–153.
18. Кулагин Д. А. Построение топологической структуры тягового преобразователя частоты. *Межвузовский сборник научных трудов «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов»*. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа. 2014. № 1(3). С. 33–35.
19. Кулагін Д. О. Визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна з урахуванням процесів насичення. *Електротехніка та електроенергетика*. 2014. №1. С. 55–60.
20. Кулагін Д. О. Аналіз енергетичних потоків тягового перетворювача частоти. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2012. № 15(91). С. 337–339.
21. Кулагін Д. О. Алгоритм роботи інформаційно-керуючої системи рухом моторвагонного рухомого складу за умови відставання від графіка руху. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 4. С. 3–6.
22. Кулагін Д. О. Аналіз роботи керуючої системи тягового перетворювача частоти моторвагонного рухомого складу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 5. С. 23–26.
23. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 6. С. 49–55.
24. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 6. С. 103–110.
25. Кулагін Д. О. Керування моторвагонним рухомих складом за умови відставання від графіка руху. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. вип. 145. С. 115–119.
26. Kulagin D. O., Andryenko P. D. Features of Monitoring the Traction Transmission of a Running Electrical Complex in the Event of its Deviation from the Schedule. *Computational problems of electrical engineering*. 2014. Vol. 4, № 1. P. 11–16. *Здобувачем здійснено розробку структури тягової електропередачі автономного локомотива*.
27. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Побудова схеми тягової електропередачі моторвагонного поїзда з можливістю рекуперації. *Електрифікація транспорту*. 2014. № 7. С. 121-126. *Здобувачем здійснено розробку структури тягової електропередачі автономного локомотива, проаналізовано характерні режими роботи створеної системи*.
28. Кулагін Д. О., Роменський І. С. Проектування інтелектуальної системи керування тяговими електроприводами. *Восточно-европейский журнал передових технологий*. 2015. № 9(74). С. 41-46. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, створено інтелектуальну систему керування тяговим електроприводом, проаналізовано гальмівні режими роботи створеної системи*.
29. Кулагін Д. О., Чернецький Б. С. Особливості вибору тягових електродвигунів для побудови систем рухомих електротехнічних комплексів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 2/1(22). С. 9-12. *Здобувачем здійснено аналіз особливостей вибору тягових електродвигунів для різних конструкцій рухомих електротехнічних комплексів*.
30. Кулагін Д. О. Визначення особливостей побудови тягових електроприводів промтранспорту. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2014. № 2. С. 147-152.
31. Кулагін Д. О., Чернецький Б. С. Особливості побудови тягових електроприводів рухомих електротехнічних комплексів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. №

3/1(23). – С. 13-17. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, встановлено характерні особливості побудови систем тягових електроприводів рухомих електротехнічних комплексів.*

32. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Критерій керування переміщенням автономних рухомих електротехнічних комплексів. *Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university*. Melitopol: TSATU, 2015. Is. 5, vol.1. С. 185-203. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, проведено математичне описання та фізичне роз'яснення отриманого критерію керування.*

33. Kulagin D. O., Chernetskiy B. S. Analysis of Modes Traction Frequency. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2015. № 19(95). P. 92-94. *Здобувачем здійснено аналіз режимів роботи тягового перетворювача частоти для різних типових режимів його роботи.*

34. Кулагін Д. О. Дослідження електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. *Електротехніка та електроенергетика*. 2015. №1. С. 39-45.

35. Kulagin D. A. Prospects of modern diesel trains creation in the countries of the eurasian space. *Modern Problems of Russian Transport Complex Scientific Journal*. 2014. № 5. P. 53-57.

36. *Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием) / отв. ред. В. А. Шабанов. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2016. 660 с. Здобувачем здійснено розробку алгоритму системи захисту електричних кіл електромеханічної системи.*

37. Kulagin D. O. Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve movement. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2016. № 2. С. 60-67.

38. Кулагін Д. О., Яценко Д. В. Investigation of peculiarities of decomposition of traction electric drives of mobile electrotechnical complexes. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 2/1(34). С. 31-38. *Здобувачем здійснено розробку принципів та підходів щодо декомпозиції електромеханічної системи, обґрунтовано її доцільність та ефективність, розраховано величини приросту енергоефективності від проведення такої декомпозиції.*

39. Павлов Г.О., Кулагін Д.О. Аналіз техніко-економічних показників відвальної оранки земельних ділянок тракторами різної потужності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. Том 29 (68). № 5. 2018. Частина 3. С. 54-61. *Здобувачем здійснено розробку принципів та підходів щодо аналізу техніко-економічних показників відвальної оранки земельних ділянок тракторами різної потужності, обґрунтовано її доцільність та ефективність.*

#### **праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

40. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д., Андрієнко Д. С. Аналіз режимів роботи модернізованої тягової електропередачі автономного локомотива. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика». Кременчук. 2012. Вип. 2. С. 615–617. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, створено модель тягової електропередачі автономного локомотива, проаналізовано режими роботи системи.*

41. Кулагін Д. О. Базові технічні рішення синтезу та побудови систем керування перетворювачами для тягових автономних електропередач змінного струму. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського, м. Кременчук. 2014. № 1(2). С. 145–147.

42. Кулагін Д. О. Топологічні моделі побудови перетворювачів тягових електропередач змінного струму. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Кременчук : КрНУ. 2014. С. 37–38.

43. Кулагін Д. О. Визначення способу керування автономною тяговою електропередачею моторвагонного поїзда. Тезиси III-й Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи взаємодіяння залізничних доріг і промислових підприємств», Днепропетровский національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ. ДНУЖТ. 2014. С. 55–56.

44. Кулагін Д. А. Автоматизована система управління динамікою моторвагонного подвижного складу. Сборник тезисов II-й Міжнародного науково-технічного семінара «Комп'ютерне моделювання в залізничному транспорті : динаміка, міцність, знос». Брянськ. 2014. С. 39–41.

45. Кулагін Д. О. Вплив насичення магнітних кіл на механічні характеристики тягових двигунів змінного струму. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки». Одеса. 2014. С. 21–24.

46. Кулагін Д. О. Особливості побудови інформаційно-керуючих систем залізничного транспорту. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Інформаційні та моделюючі технології». Черкаси. 2014. С. 52.

47. Кулагін Д. О. Аналіз енергетичних потоків тягового перетворювача частоти. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми розвитку залізничного транспорту». Луганськ. 2014. С. 33–36.

48. Kulagin D. A., Andrienko P. D. Implementation of rational management railcar rolling stock in terms of the backlog from the schedule. Труды X юбилейной международной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem», Московский государственный университет путей сообщения. М. : МИИТ. 2014. С. 13–14. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, створено математичну постановку задачі подолання відхилення від графіка руху, здійснено переклад статті на іноземну мову.*

49. Kulagin D. O. Analysis of approaches to building a modern high-speed train control systems as. Сборник материалов IV международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» ИнтеллектТранс-2014, Петербургский государственный университет путей сообщения. Санкт-Петербург : ПГУПС. 2014. С. 271–277.

50. Kulagin D. O. Efficient use of fuel and energy resources on the railway transport. Матеріали 5-й Міжнародної науково-практичної конференції «Енергосбереження на залізничному транспорті і в промисловості», Днепропетровский національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ. ДНУЖТ. 2014. С. 92–93.

51. Kulagin D. O. Increase of efficiency using of energy resources on the railway transport. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екології та енергозбереження». Миколаїв. 2014. С. 27–28.

52. Кулагін Д. А. Конструкції тягових електропередач автономного моторвагонного електротранспорту. Сборник трудов LXXIV Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы», Петербургский государственный университет путей сообщения. Санкт-Петербург : ПГУПС. 2014. С. 334–336.

53. Kulagin D. O. Development of the system for the execution of the algorithm motion control railcar rolling stock. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології». 2014. С. 105–107.

54. Kulagin D. O. The need for the introduction of energy saving measures for diesel generator transport. *Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості* : Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 10 червня – 13 червня 2015 р.). Д. : ДНУЗТ, 2015. Р. 74-75.

**праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

55. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №45049 від 06.08.2012 «Комп'ютерна програма «Система розрахунку параметрів подвійного регулятора струму» / Кулагін Д. О.

56. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №50594 від 06.08.2013 «Програма для розрахунку коефіцієнтів регулятора частоти вихідного струму для автоматичної системи керування автономного інвертора напруги» / Кулагін Д. О.

57. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №51134 від 06.08.2013 «Програма для розрахунку коефіцієнтів пристрою аварійного керування систем автоматичного ведення електрорухомого складу з тяговими електропередачами змінного струму» / Кулагін Д. О.

58. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54959 від 23.05.2014 «Система керування рекуперацією енергії моторвагонного електротранспорту» / Кулагін Д. О.

59. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54958 від 23.05.2014 «Програмний комплекс «Розрахунок параметрів та побудова алгоритмів роботи системи керування процесом відбору потужності для тягових електропередач змінного струму дизель-поїздів» / Кулагін Д. О.

60. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №54960 від 23.05.2014 «Програмний комплекс «Розрахунок параметрів та побудова алгоритмів роботи системи керування модулем вектора потокозчеплення тягових асинхронних двигунів моторвагонного автономного поїзда» / Кулагін Д. О.

61. Пат. 55755 (Україна), МПК (2009) H02P5. Пристрій для регулювання швидкості електродвигуна змінного струму / Кулагін Д. О., Качур О. С., Андрієнко П. Д. ; u201006848; заявл. 03.06.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. №24., 2010. 3 с. *Здобувачем здійснено математичне формулювання способу регулювання швидкості електродвигуна змінного струму, розроблено ієрархічну структуру роботи пристрою, виконано аналіз роботи зворотних зв'язків.*

62. Пат. 63239 (Україна), МПК (2011.01) H02P7/00. Пристрій для формування кривої зміни частоти струму частотно-керованого електроприводу з обмеженням активної складової струму та ривка / Кулагін Д. О., Качур О. С., Андрієнко П. Д. ; u201013488; заявл. 15.11.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. №19., 2011. 5 с. *Здобувачем здійснено математичне формулювання способу обмеження ривка в системі електроприводу, створено топологію пристрою.*

63. Пат. 79056 (Україна), МПК (2011.01) H02M7/12. Спосіб регулювання струму навантаження трифазного перетворювача для частотно-керованих електроприводів змінного струму / Кулагін Д. О. u201211591 ;. 2012 р. заявл. 08.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. №7, 2013. 5 с.

64. Пат. 79922 (Україна), МПК (2011.01) B60L11/00. Частотно-керований пристрій змінного струму для живлення тягового електродвигуна автономного локомотива / Кулагін Д. О. u201211592;. 2012 р. заявл. 08.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9, 2013. 5 с.

65. Пат. 79924 (Україна), МПК (2011.01) H02P 5/00. Пристрій аварійного керування тяговою частотно-керованою передачею змінного струму автономного локомотива / Кулагін Д. О. u201211602;. 2012 р. заявл. 08.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9, 2013. 5 с.

66. Пат. на винахід 106955 (Україна), МПК (2014.01) H02M 7/12 (2006.01), B60L 7/00, B60L 15/00. Спосіб керування рекуперацією енергії для тягових електропередач змінного струму моторвагонних автономних поїздів / Кулагін Д. О., a201314942; 2013 р. заявл. 20.12.2013; опубл. 27.10.2014, Бюл. №20, 2014. 4 с.

67. Пат. на винахід 108181 (Україна), МПК (2015.01) H02P 27/04 (2006.01), H02P 27/00. Спосіб керування потоком ротора тягових асинхронних двигунів моторвагонного електротранспорту / Кулагін Д. О. a201403539 ; 2014 р. заявл. 07.04.2014; опубл. 25.03.2015, Бюл. №20, 2015. 4 с.

68. Пат. на винахід 110855 (Україна), МПК (2016.01) B61C 17/12 (2006.01), B61L 25/00, G05B 13/02 (2006.01). Спосіб оптимізації роботи автономного моторвагонного електротранспорту / Кулагін Д. О. a201403535 ; 2014 р. заявл. 07.04.2014; опубл. 25.02.2016, Бюл. №4, 2016, 4 с.

69. Пат. на корисну модель 103754 (Україна), МКВ (2015) H02P 23/14, H02P 23/06, H02M 5/00, B60L 3/12. Пристрій для керування тяговим рухомим електротехнічним комплексом / Кулагін Д. О. u201506977 ; 2015 р. заявл. 13.07.2015; опубл. 25.12.2015, Бюл. №24, 2015. 4 с.

70. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №63233 від 28.12.2015 Комп'ютерна програма «Система прогнозування оптимальної траєкторії руху автономного еле-

ктротехнічного комплексу» / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. *Здобувачем здійснено створення алгоритму функціонування прогнозування оптимальної траєкторії руху автономного електротехнічного комплексу.*

71. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №63235 від 28.12.2015 Комп'ютерна програма «Програма для проектування системи керування рухом автономного електротехнічного комплексу» / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. *Здобувачем здійснено створення алгоритму функціонування проектування системи керування рухом автономного електротехнічного комплексу.*

72. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №63232 від 28.12.2015 Комп'ютерна програма «Система керування завантаженням головної енергетичної установки автономного електротехнічного комплексу» / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. *Здобувачем здійснено створення алгоритму функціонування керування завантаженням головної енергетичної установки автономного електротехнічного комплексу.*

73. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №63234 від 28.12.2015 Комп'ютерна програма «Програма для розрахунку параметрів тягової асинхронної машини з урахуванням насичення магнітних кіл» / Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. *Здобувачем здійснено створення алгоритму функціонування розрахунку параметрів тягової асинхронної машини з урахуванням насичення магнітних кіл.*

74. Пат. на корисну модель 105994 (Україна), Н02Р 5/74 (2006.01). Дводвигуновий електропривід імпульсного регулювання узгодженого обертання асинхронних двигунів з фазними роторами / Коцур М. І., Андрієнко П. Д., Кулагін Д. О., Коцур І. М., Андрієнко Д. С., Андрієнко А. А. u201510484 ; 2015 р. заявл. 27.10.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. №7, 2016. 6 с. *Здобувачем здійснено створення способу досягнення узгодженого обертання асинхронних двигунів з фазними роторами.*

75. Пат. на корисну модель 110273 (Україна), Н02Р 23/14 (2006.01), Н02Р 23/06(2016.01), Н02М 5/00, В60L 3/12 (2006.01). Пристрій для керування тяговим рухомим електротехнічним комплексом / Кулагін Д. О., Коцур М. І., Андрієнко П. Д. u201512869 ; 2016 р. заявл. 25.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №19. 2016. 4 с. *Здобувачем здійснено створення алгоритму функціонування пристрою для керування тяговим рухомим електротехнічним комплексом.*

76. Кулагін Д. О., Кулагіна К. О., Калініченко Н. А. Використання 4q-S перетворювачів в тягових передачах електропоїздів змінного струму. *Тиждень науки. Тези доповідей наук.-техн. конф., м. Запоріжжя, ЗНТУ, 9-13 квітня 2012 р. Запоріжжя : вид-во ЗНТУ. 2012. т.1. С. 160–161. Здобувачем здійснено постановку мети дослідження, виконано наукове керівництво розробки алгоритму використання 4q-S перетворювачів в тягових передачах електропоїздів змінного струму.*

77. Кулагін Д. О., Кулагіна К. О., Калініченко Н. А. Базові технічні рішення синтезу та побудови перетворювачів частоти для тягових електропередач дизель-поїздів змінного струму. *Тиждень науки. Тези доповідей наук.-техн. конф., м. Запоріжжя, ЗНТУ, 9-13 квітня 2012 р. Запоріжжя : вид-во ЗНТУ. 2012. т.1. С. 158–159. Здобувачем здійснено постановку мети дослідження, виконано наукове керівництво розробки, проаналізовано перспективні рішення синтезу та побудови перетворювачів частоти для тягових електропередач дизель-поїздів.*

78. Кулагін Д. А. Определение рационального способа вождения моторвагонного электротранспорта переменного тока по наклонным профилям железнодорожного пути. *Вестн. Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2014. № 1 (86). С. 32–37.*

79. Кулагін Д. А. Реализация рациональных алгоритмов ведения моторвагонных автономных поездов по наклонным элементам профиля железнодорожного пути. *Промышленный транспорт Казахстана. 2014. № 2. С. 41–46.*

80. Кулагін Д. О. Особливості побудови систем керування для тягових електропередач моторвагонних поїздів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2014. вип. 143. С. 247.*

81. Кулагін Д. О. Інноваційні технології підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів на залізничному транспорті. *Енергетика: економіка, технології та екологія*. 2014. № 2 С. 26–30.

82. Кулагін Д. О. Закон розподілу поточкозчеплення тягового асинхронного двигуна у часі для задачі корегування графіка руху поїзда. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 5 (108). С. 20–22.

83. Кулагін Д. О. Закон керування моторвагонним рухомим складом при русі уклонами. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології»*. Вип. 24. К. : ДЕУТ, 2014. С. 11–20.

84. Кулагін Д. О. Визначення рівняння екстремалі маршрутної карти для управління параметрами руху тягового рухомого складу. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2014. № 1. С. 132–134.

85. Кулагін Д. А. Способ управления тяговым асинхронным двигателем для обеспечения рационального тягового усилия при движении моторвагонного поезда. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. Ростов-на-Дону. 2014. № 3(55). С. 109–117.

86. Кулагін Д. А. Анализ конструкций тяговых преобразователей переменного тока для моторвагонных поездов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные направления научных исследований: тенденции и перспективы», Уральский государственный университет путей сообщения. Челябинск : УрГУПС. 2014. С. 25–29.

87. Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д. Визначення рівняння маршрутної карти руху для керування поїздом. Тези доповідей 74-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ. ДНУЖТ. 2014. С. 115–116. *Здобувачем здійснено постановку мети дослідження, створено математичну постановку задачі визначення рівняння маршрутної карти руху для керування поїздом.*

88. Кулагін Д. О. Інноваційні технології підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів на залізничному транспорті. *Збірник тез доповідей 1-ї Міжнародної науково-практичної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. PEMS'14»*. Київ. 2014. С. 42.

89. Кулагін Д. О. Підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів на залізничному транспорті. Матеріали 8-мої науково-практичної конференції «Енергетична безпека на транспорті: підвищення ефективності, зниження залежності від природного газу». Київ. 2014. С. 89–92.

90. Kulagin D. O., Nitsenko, V. V. Research on effect of differential-phase protection of busbars system with voltage of 110-750 kv. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 4. Р. 72–79. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, встановлено характерні аварій у силових колах, визначено межі та порядок їх впливу на роботу системи електропостачання.*

91. Kulagin D. O., Nitsenko V. V. Improvement implementation methods of relay busbars protection of switchgears. *Technical Electrodynamics*. 2017. № 6. Р. 61–71. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань, встановлено алгоритми роботи системи релейного захисту.*

92. Kulagin D. O., Fedosha D. V., Nitsenko V. V., Shevchenko S. Yu., Danylchenko D. O. Using a phase-differential busbar protection for switchgears of power system facilities. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. Р. 63–67. *Здобувачем здійснено постановку мети та завдань дослідження, розроблено алгоритми управління енергетичною системою.*

### **Відомості про апробацію результатів дисертації.**

Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися і отримали позитивні відгуки на таких наукових заходах: Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми ене-

рогресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», 2011 – 2015 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту» «Транселектро», 2011 – 2016 р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика» (2011 – 2017 р.); I Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы электроэнергетики. Алтай – 2013», г. Барнаул, 2013 г.; X юбилейная международная научно-практическая конференция «Trans-Mech-Art-Chem», Московский государственный университет путей сообщения, Россия, г. Москва, 2014 г.; Международная научно-практическая конференция «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», Московский государственный университет путей сообщения, Россия, г. Москва, 2014 г.; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные направления научных исследований: тенденции и перспективы», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Челябинск, 2014 – 2018 г.; IV международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы на транспорте» ИнтеллектТранс-2014, Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, г. Санкт-Петербург, 2014 г.; 74-я ежегодная научно-техническая конференция «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы», Петербургский государственный университет путей сообщения, Россия, г. Санкт-Петербург, 2014 г.; Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», 2014, 2015 р.; III-я Международная научно-практическая конференция «Перспективы взаимодействия железных дорог и промышленных предприятий», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2014 р.; 74-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2014 р.; 5-я Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2014 р.; II-й Международный научно-технический семинар «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ», Россия, г. Брянск, 2014 г.; Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки», м. Одеса, 2014, 2015 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція «Інформаційні та моделюючі технології», м. Черкаси, 2014 р.; межвузовский семинар «Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов», Уфимского государственного нефтяного технического университета, Россия, г. Уфа, 2014 – 2018 г.; 76-та Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», м. Харків, 2014 р.; IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екології та енергозбереження», м. Миколаїв, 2014 р.; Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS», м. Київ, 2014 – 2018 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми розвитку залізничного транспорту», м. Луганськ, 2014, 2015 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні управляючі системи та технології», м. Одеса, 2014, 2015 р.; 27-я Международная научно-практическая конференция «Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті», м. Харків, 2014 р.; Тижні наук запорізького національного технічного університету, 2011 – 2020 р.; Розширений науковий семінар Харківської філії Державного підприємства «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України», 2011 р.; 8-ма науково-практична конференція «Енергетична безпека на транспорті: підвищення ефективності, зниження залежності від природного газу», м. Київ, 2014 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», смт Воловець, 2014, 2015 р.; VI Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена пам'яті академіка І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України», ТДАТУ, смт. Кирилівка, Запорізькій області, 2015–2017 р.

## АНОТАЦІЯ

*Кулагін Д. О. Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук (доктора наук) за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» (14 – Електрична інженерія). – Державний університет інфраструктури та технологій, 2020.

Наукові положення та отримані в роботі нові науково обґрунтовані результати у галузі електричної інженерії в сукупності вносять вклад у розв'язок важливої науково-прикладної проблеми галузі – розвитку наукових основ зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, в основі якої лежить недовикористання енергетичного потенціалу дизель-генераторних систем, а також практичної проблеми – зниження енергетичних витрат транспортної галузі.

В результаті проведення досліджень підтверджена наукова гіпотеза – встановлено, що у дизель-генераторних енергетичних установках засобів транспорту максимальний потенціал енергозбереження в декомпозованій системі досягається використанням схем зі змінною структурою і відповідних алгоритмів керування, за яких кожен силовий елемент декомпозованої структури своїм режимом роботи має досягти мінімального рівня втрат енергії у всій дизель-генераторній системі в цілому. Задачу загального керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку варіантів найбільш енергоефективної схеми змінної структури, законів та алгоритмів взаємодії між компонентами даної змінної структури, за яких досягаються всі робочі характеристики транспортного засобу.

**Ключові слова:** енергетична установка, декомпозиція, синергетичні властивості, статичний коефіцієнт корисної дії, динамічний коефіцієнт корисної дії, енергоефективність, тягові властивості, швидкість, прискорення, ривок, дизель-генераторна система, електропривод змінного струму, тяговий двигун, накопичувач, рекуперация, електричне гальмування.

## АННОТАЦИЯ

*Кулагин Д. А. Методология повышения энергоэффективности дизель-генераторных энергетических установок средств транспорта.* – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (доктора наук) по специальности 05.05.03 «Двигатели и энергетические установки» (14 – Электрическая инженерия). – Государственный университет инфраструктуры и технологий, 2020.

Научные положения и полученные в работе новые научно обоснованные результаты в области электрической инженерии в совокупности вносят вклад в решение важной научно-прикладной проблемы отрасли – развития научных основ уменьшения энергоёмкости дизель-генераторных энергетических установок средств транспорта, в основе которой лежит недоиспользование энергетического потенциала дизель-генераторных систем, а также практической проблемы – снижения энергетических затрат транспортной отрасли.

В результате проведения исследований подтверждена научная гипотеза – установлено, что в дизель-генераторных энергетических установках средств транспорта максимальный потенциал энергосбережения в декомпозированной системе достигается использованием схем с переменной структурой и соответствующих алгоритмов управления, при которых каждый силовой элемент декомпозированной структуры своим режимом работы должен достичь минимального уровня потерь энергии во всей дизель-генераторной системе в целом. Задачу общего управления такой системой необходимо формулировать как задачу поиска вариантов наиболее энергоэффективной схемы переменной структуры, законов и алгоритмов взаимодействия между компонентами данной переменной структуры, при которых достигаются все рабочие характеристики транспортного средства.

**Ключевые слова:** энергетическая установка, декомпозиция, синергетические свойства, статический коэффициент полезного действия, динамический коэффициент полезного действия,

энергоэффективность, тяговые свойства, скорость, ускорение, рывок, дизель-генераторная система, электропривод переменного тока, тяговый двигатель, накопитель, рекуперация, электрическое торможение.

### ABSTRACT

*Kulagin D.O. Methodology for increasing the energy efficiency of diesel-generator power plants.* – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences (Doctor of Science) in specialty 05.05.03 «Engines and power plants» (14 – Electrical Engineering). – State University of Infrastructure and Technology, 2020.

Fundamental scientific statements as well as principally novel and scientifically justified results obtained in this work contribute to understanding of a highly important problem in the field of electrical engineering, i.e. fundamental development of energy saving vehicle diesel generators on the grounds of optimizing energetic potential of the diesel generator systems and also practical implications such as reduction of energy consumption in the transportation industry.

As a result, the following scientific hypothesis was justified: the maximum energy saving potential for each component of the vehicle diesel generator system (decomposed system) can be achieved by the variable structure control approach and other control algorithms, which ultimately allows minimal level of energy consumption in the whole diesel generator system. The problem of the general system control shall be formulated as the problem where the most energy saving variable structure approach as well as the laws and algorithms of interaction between the variable structure components need to be found provided all the working characteristics of the vehicle are satisfied.

Based on the analysis of the scientific and applied problem of the industry - the development of scientific bases for reducing the energy consumption of diesel generating power plants, which is based on underutilization of energy potential of diesel generating systems, as well as economic problems - reducing energy costs of the transport industry. is to increase the energy efficiency of diesel generator power plants. To achieve this goal based on the approaches of stratification, composition, localization and variation of the construction of scientific and applied problems, the main tasks are: decomposition of diesel-generator power plants and development and analysis of a mathematical model of the decomposed structure; research of reserves of increase of energy efficiency of diesel-generator power installations of vehicles in the established operating modes; research of reserves of increase of energy efficiency of diesel-generator power installations of vehicles in transient modes of operation; analysis of reserves for increasing the energy efficiency of diesel-generator power plants of vehicles in the application of electric braking at short distances; approbation of the methodology for increasing the energy efficiency of diesel-generator power plants. Accordingly, it is determined that the object of study are energy, electromechanical and electromagnetic processes of energy conversion in diesel-generator power plants of vehicles and their elements. The subject of the study is to establish patterns between the parameters of the modes of operation of diesel-generator power plants of vehicles and energy efficiency indicators, taking into account the coordination and optimization of the processes of interaction of components in power plants.

The scientific hypothesis of the study is that in diesel generator power plants the maximum energy saving potential in the decomposed system is achieved by using variable structure circuits and appropriate control algorithms, in which each power element of the decomposed structure must reach a minimum level of energy loss. the entire diesel generator system as a whole. The task of general control of such a system should be formulated as the task of finding options for the most energy-efficient scheme of variable structure, laws and algorithms of interaction between the components of this variable structure, which achieve all the performance of the vehicle.

**Keywords:** energy system, decomposed system, synergetic properties, static efficiency coefficient, dynamic efficiency coefficient, energy efficiency, traction properties, velocity, acceleration, jerk, diesel generator, alternating current electric drive, traction engine, capacitor, recuperation, dynamic braking.

**Кулагін Дмитро Олександрович**  
**«Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних  
енергетичних установок засобів транспорту»**

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Підписано до друку 02.11.2020 р. Формат 60×84 1/16.  
Папір офсетний. Друк лазерний. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 1.9. Обл. – вид. арк. 1.9. Тираж 100 прим. Зам. № 7-145.

---

Надруковано в друкарні Державного університету інфраструктури та технологій  
Адреса: вул. Кирилівська, 9, Київ, 04071, тел. 044-417-57-23.