

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Павленка Максима Анатолійовича на дисертаційну роботу Кулагіна Дмитра Олександровича на тему: «Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» (галузь 14 – Електрична інженерія).

**Актуальність теми дисертації.** 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 енергоємності 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 енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

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

**Наукова новизна, обґрунтованість і вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

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 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.

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 декомпозованих 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 декомпонованої 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, навантаження транспортного засобу є значно меншим ніж номінальне (до того ж узяті 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.

Ступінь достовірності та обґрунтованості наукових положень, висновків та результатів дисертації 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. Результати дослідження отримані автором особисто.

## **Практична цінність положень, результатів та висновків дисертаційної роботи.**

1. На основі виконаної декомпозиції, узагальнення та класифікації отриманих декомпозованих 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.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження підтверджується використанням результатів роботи Кулагіна Д. О. у науково-дослідній роботі фахівців Національного університету «Запорізька політехніка» при виконанні 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 виробництва», «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.

#### **Оцінка повноти викладення дослідження в опублікованих роботах.**

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 92 друкованих наукових працях, у тому числі: 6 монографіях, 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.

В опублікованих працях висвітлені основні наукові положення дисертації, які становлять наукову новизну і винесені на захист. Оформлення дисертації та автореферату здійснено з дотриманням вимог, які пред'являються до докторських дисертацій.

Положення, результати, висновки і рекомендації дослідження є особистим досягненням автора. Конкретний особистий внесок автора в спільні наукові роботи показаний у переліку основних опублікованих робіт за темою дисертації.

Автореферат роботи розкриває зміст дослідження і не містить інформації, відсутньої в дисертації.

#### **Перелік зауважень до дисертаційної роботи.**

1. На стор. 162 автор при визначенні особливостей аналізу енергетичної ефективності тягового редуктора не враховує можливості зміни кількості ступенів редуктора на різних типах засобів транспорту.



2. На стор. 238 автор при побудові матриця взаємного впливу зміни характеристик елементу декомпозованої групи на загальний енергетичний потенціал всієї енергетичної установки не наводить кількісної оцінки взаємного впливу, що призводить до складності розуміння ступеню такого впливу.

3. На стор. 251 автор стверджує, що 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. Тут же він доводить дане твердження, проте не надає пояснення яким чином використовувати приведений підхід в разі розвороту транспортного засобу і руху в зворотному напрямку.

4. На стор. 269 автор зазначає, що ведення транспортних засобів в міському режимі має ряд специфічних особливостей: для такого режиму характерні часті зупинки при високій густині руху. В цих умовах транспортний засіб повинен реалізовувати високі значення розгінного та гальмівного прискорень за встановленого значення ривка. В наслідок цього енергетичним установкам при міському русі властиві більш високі значення потужності на одиницю маси. Режим ведення транспортного засобу обирається у відповідності до розкладу руху та умов, що характеризують певні тягово-енергетичні показники. Від правильно обраного режиму ведення залежать витрати первинного енергоносія.

Проте не визначено меж поняття коротка дистанція, яке буде відрізнятись для різних типів розглядуваних транспортних засобів.

5. На стор. 290 визначено, що 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 виконаємо на основі нейронної мережі. Не можна не погодитись з автором, що використання нейронної мережі для цього дозволить забезпечити встановлені вимоги щодо роботи в автоматичному режимі з максимальною швидкістю без необхідності втручання оператора в процес визначення динамічних параметрів під час безпосередньої роботи. Також використання нейронної мережі дозволяє закласти значну кількість прикладів тягових характеристик, типових графіків руху та режимів роботи для навчання та вибору найбільш оптимальних за тих чи інших умов роботи. Проте в роботі не показано вимог до типу мережі, методики її вибору, що ускладнює використання запропонованого методу урахування дозволених показників швидкості, прискорення та ривка.

6. На стор. 358 для аналізу рівня накопиченої енергії проведено дослідження трактора відповідно до стандартного циклу змішаної їзди NEDC (рис. 5.10), а також для порівняння розглянуто стандарті їздові цикли ECE 15 (рис. 5.11), цикл EUDC (рис. 5.12) та цикл FTP-75 (рис. 5.13). Проте, оскільки в роботі охоплюються засоби транспорту з різним типом рушія, автором не вказано за якою методикою можна оцінити рівень накопиченої енергії для інших типів транспортних засобів, окрім колісних.

Особливо варто відмітити, що дані зауваження жодним чином не знижують загальної високої оцінки роботи та вкладу Кулагіна Д. О. 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.

#### **Висновок про відповідність дисертаційної роботи існуючим вимогам.**

Зміст матеріалу, структура, послідовність та стиль викладення матеріалу в дисертації відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій. 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.

Зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» за пунктами:

1. Теорія двигунів і енергоустановок, експериментальні дослідження процесів у них, дослідження та розрахунки нових схем або типів, теоретичні основи їх проектування, узгодження з характеристиками об'єктів призначення та споживачами енергії. Комп'ютерно-інтегроване проектування двигунів і енергоустановок;

4. Конструкції двигунів і енергоустановок. Розроблення деталей, вузлів, агрегатів;

8. Розроблення систем автоматичного керування (САК) двигунів і енергоустановок на усталених і перехідних режимах роботи. Теоретичні й експериментальні методи дослідження САК.

В цілому дисертаційна робота Кулагіна Дмитра Олександровича на тему «Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту», подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» (галузь 14 – електрична інженерія) є завершеною, самостійною науковою роботою, яка виконана у відповідності з поставленими автором науковими завданнями та метою, поставленими у результаті проведеного аналізу особливостей проблеми підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту.

Автором послідовно розроблено методи, принципи та підходи, методичні та алгоритмічні засоби розвитку наукових основ зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних 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, що у сукупності становить єдину методологію для вирішення визначеної автором контрадикції.

Отже, на підставі аналізу дисертації, автореферату, публікацій автора у наукових виданнях можна зробити висновок, що дисертаційна робота «Методологія підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту», подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» (галузь 14 – електрична інженерія) виконана на відповідному науковому і практичному рівні, який повністю відповідає вимогам щодо дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук, зокрема пунктам 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Кулагін Дмитро Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» (галузь 14 – електрична інженерія).

Начальник кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба  
доктор технічних наук професор



Максим ПАВЛЕНКО

„16” 11 2020 р.

Підпис Павленка М.А. засвідчую.

Заступник начальника штабу Харківського національного університету  
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Дмитро ГОЛОВНЯК

„16” 11 2020 р.