

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу

Кулагіна Дмитра Олександровича

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

яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки (галузь знань 14 – Електрична інженерія)

Дисертаційну роботу виконано у Національному університеті «Запорізька політехніка» (м. Запоріжжя) та Державному університеті інфраструктури та технологій (м. Київ) Міністерства освіти і науки України. Дослідження присвячене покращенню економічних та експлуатаційних показників роботи дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту шляхом обладнання їх електронною системою керування зі штучним інтелектом. Дисертація складається з анотації, вступу, шістьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, десятих додатків.

Актуальність обраної теми

Факт наявності недовикористання енергетичного потенціалу дизель-генераторних систем в експлуатації лежить в основі практичної проблеми зниження енергетичних витрат транспортної галузі, зокрема за рахунок підвищення енергетичної ефективності парку дизельних агрегатів. Тому безперечно, що вирішення задачі підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту дозволить забезпечити енергозбереження та раціональне використання енергії під час виконання технологічних процесів у всіх службах та господарствах транспорту. Отже, тема дисертаційної роботи і напрямок її дослідження є актуальними.

Актуальність теми дослідження підтверджується також тим, що воно пов'язане з виконанням великої кількості держбюджетних науково-дослідних робіт в рамках «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації є високою і базується на такому. Детальне ознайомлення з текстом наукового дослідження, авторефератом і публікаціями Д.О. Кулагіна дозволяє стверджувати, що підхід дисертанта до аналізу предмета дослідження є фундаментальним та ґрунтовним. Дисертація має логічну структуру, яка дозволяє розкрити поставлені дослідницькі завдання та досягти поставленої мети.

Слід звернути увагу на чітку **структуру дослідження**, послідовність та

аргументованість положень дисертації. В дисертації досліджено та систематизовано теоретичні підходи, понятійно-категоріальний апарат і методологічний інструментарій, якими оперує автор, і які пояснюють об'єктивні та суб'єктивні детермінанти оптимізації процесів взаємодії компонентів у енергетичних установках.

Методологічною основою дослідження є визначена здобувачем проблема наявності протиріччя, яке полягає у необхідності впровадження енергозбереження в усіх системах засобів транспорту при практичній неможливості забезпечення розрахункових показників даного процесу, яка викликана відсутністю наукових методів, що дозволяють досягти максимального потенціалу енергозбереження для даних систем.

На основі проведеного аналізу науково-прикладних проблем транспортної галузі, а також цієї практичної проблеми, автором поставлено мету дослідження. Для досягнення визначеної мети на основі підходів стратифікації, композиції, локалізації та варіантіфікації побудови науково-прикладної проблеми сформульовано основні задачі дослідження, коректно визначено об'єкт та предмет дослідження, наукову гіпотезу.

Зокрема, запропонована автором наукова гіпотеза 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 для всій дизель-генераторній системі в цілому.

Треба відзначити аргументоване застосування автором таких методів досліджень, які базуються на системному підході та фундаментальних положеннях теорії енергетичних установок, електротехніки, електромеханіки, математичної фізики, теорії машинно-тракторних агрегатів та засобів транспорту. Застосування цих методів дало можливість забезпечити органічну єдність теорії і практики, поєднати різні підходи: критичний, раціональний, ретроспективний, логічний, що також виділити ключові суперечності, які стосуються практичної реалізації встановлення закономірностей між параметрами режимів роботи дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту та показниками енергетичної ефективності з урахуванням узгодження та оптимізації процесів взаємодії їх компонентів.

Всі теоретичні положення та висновки підкріплені результатами експериментальних польових досліджень дизель-електричного трактору та дизель-поїзду у порівнянні їх з результатами математичного моделювання.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректністю постановок математичних завдань, застосуванням сучасних процедур

математичного аналізу і методів математичної фізики, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичної суті процесів, які описуються. Тобто, математичний апарат дисертантом використаний грамотно.

Наукові результати теоретичних досліджень здобувача успішно використані для створення системи штучного інтелекту для керування дизель-енергетичними установками змінного стуму для транспортних засобів, що підтверджується експериментальними даними, отриманими в роботі.

Достовірність експериментальних даних забезпечується використанням сучасних засобів і методик проведення досліджень.

У якості нових наукових результатів здобувачем висунуті такі положення:

- узагальнена класифікація дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту за тяговими потужностями та споживанням власних потреб, яка дозволила впровадити уніфікацію підходів з проектування та дослідження енергетичних установок;

- концепція побудови системи автоматичного керування дизель-генераторними енергетичними установками засобів транспорту на основі поєднання методів використання ройового інтелекту, нейронних мереж, гнучких кінематичних траєкторій та принципів термінального керування, яка дозволяє реалізувати необхідні види алгоритмів керування енергетичною установкою з урахуванням специфіки роботи транспортного засобу, враховувати всі фазові кінематичні обмеження, долати відхилення від основної кривої руху та забезпечити підвищення рівня енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок;

- узагальнена класифікація декомпозованих груп дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту за тяговими потужностями, яка дозволила визначити групи елементів, які чинять значний вплив на рівень втрат та запропонувати найбільш енергоефективні структури системи для енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту;

- алгоритм системи керування енергетичною установкою, який базується на мінімізації площі під кривою руху транспортного засобу при обмеженнях за максимальними величинами кінематичних характеристик руху та приводить до мінімізації тягової роботи з переміщення транспортного засобу;

- розвиток теорії декомпозиції, при якому визначаються критерії, ознаки та специфіка 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;

– подальший розвиток синергетичного методу, в якому запропоновано розглядати засоби забезпечення найбільш енергоефективного режиму роботи енергетичної установки та керування кожним з елементів декомпозованої 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 транспортних дизель-генераторних енергетичних установок;

– подальший розвиток методу проектування транспортних дизель-генераторних енергетичних установок змінного струму, що дозволив визначати реальне значення максимальної величини коефіцієнту корисної дії послідовно з'єднаних елементів цих установок для всього діапазону їх робочих потужностей;

– вдосконалений метод динамічних індуктивностей щодо врахування електричної та магнітної несиметричності контурів тягової машини та поширення його на новий клас систем – тягові електромеханічні системи змінного струму, що дозволив 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 значний вклад у розв'язання важливої науково-прикладної проблеми галузі – зменшення енергоємності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, а також практичної проблеми – зниження енергетичних витрат транспортної галузі.

Повнота викладення основних наукових положень і результатів в опублікованих роботах

Основні теоретичні положення і висновки дисертаційної роботи викладені в 92 друкованих наукових працях (58 з них одноосібно, 13 – англійською), у тому числі: 6 монографіях (1 з них одноосібна), 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, з них 6 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), в 20 матеріалах конференцій та захищені 20 патентами України на винаходи, корисні моделі та авторськими свідоцтвами.

Опубліковані наукові праці та автореферат дисертації достатньо повно відображають результати проведених наукових досліджень. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Дисертаційне дослідження виконане автором самостійно, пройшло попередню апробацію на кафедрі Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» та на

кафедри Технічних систем та процесів управління в судноводінні Державного університету інфраструктури та технологій.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання підтверджено затребуваністю результатів роботи 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 технічної документації, 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 при викладанні курсів «Енергозбереження по галузям виробництва», «Електромеханічні перехідні процеси», «Електромагнітні перехідні процеси», «Математичні задачі енергетики», для виконання курсових та дипломних проектів, випускних кваліфікаційних робіт; у науково-дослідній роботі фахівців Державного університету інфраструктури та технологій, про що є відповідні акти впровадження.

Оцінка змісту дисертації

Повний обсяг дисертаційної роботи складає 555 сторінок та включає: 131 ілюстрацію, 41 таблицю, 10 додатків, бібліографію – 325 літературних джерел.

У вступі обґрунтована актуальність теми, представлені мета й задачі дослідження, зазначена загальна методика, наукова новизна роботи й положення, що виносяться на захист.

У першому розділі – Сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту – автор, на основі аналітичного розгляду особливостей роботи дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту, виділив науково-прикладні задачі щодо побудови енергоефективних дизель-генераторних енергетичних систем. В результаті проведеного аналізу визначено, що на сьогодні виникає протиріччя, яке полягає у необхідності впровадження енергозбереження в усіх системах засобів транспорту при практичній неможливості забезпечення розрахункових показників даного

процесу, викликаного відсутністю наукових методів, які б дозволили максимально можливого потенціалу енергозбереження для даних систем.

У другому розділі – Декомпозиція дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту і розробка та аналіз математичної моделі декомпонованої структури – визначено критерії проведення декомпозиції дизель-генераторної енергетичної установки. Показано, що вирішити завдання підвищення ефективності роботи енергетичної установки можливо тільки комплексно – розглядаючи всю систему загалом, з урахуванням умов раціональної роботи її окремих компонентів та врахування взаємозв'язку між ними. Виконано декомпозицію структурної схеми енергетичної установки на шість груп та класифікацію дизель-генераторних енергетичних установок в залежності від потужності. Також в розділі описані математичні моделі статичних та динамічних процесів для кожної з груп декомпозиції, які зведені у комплексну математичну модель дизель-генераторної енергетичної установки. Описані моделі послуговували інструментом для подальших теоретичних досліджень в роботі. Слід відмітити – математична модель, розроблена на основі концепції динамічних індуктивностей, дозволяє враховувати насичення магнітної системи тягового двигуна та електричну або магнітну несиметричність контурів машини, що є одним з пунктів наукової новизни в роботі.

У третьому розділі – Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в усталених режимах роботи, та у четвертому розділі – Дослідження резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту в перехідних режимах роботи – розглянуто вплив декомпозиції на функції статичного та динамічного коефіцієнтів корисної дії енергетичних установок залежно від конструктивних особливостей та характеристик кожної окремої декомпонованої групи, експлуатаційних параметрів руху, технічного стану транспортного засобу, особливостей ведення транспортного засобу тим чи іншим оператором тощо. Визначено, що підвищення ККД за рахунок використання синергетичних властивостей енергетичної установки становить величину від 4,6% (для потужності до 70 кВт) до 7,8% (понад 300 кВт).

П'ятий розділ – Аналіз резервів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху. В цьому розділі автор, на основі аналізу ефективності використання низки накопичувачів енергії для статичних та динамічних режимів роботи дизель-генераторної енергетичної установки транспортного засобу показав, що в якості накопичувача енергії варто використовувати ємнісний накопичувач на основі модулів електрохімічних конденсаторів – суперконденсаторів, що

можна розглядати як важливий практичний висновок роботи.

Питання, пов'язані з експериментальним дослідженням системи, що розроблена, знайшли відображення в шостому розділі – Апробація методології підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних енергетичних установок засобів транспорту. Слід підкреслити, що всі експерименти виконані автором на високому технічному рівні, з використанням сучасної вимірювальної бази та їх результати не визивають сумніву та гарно збігаються з результатами математичного моделювання.

Взагалі текст дисертації викладено грамотною технічною мовою, з правильним використанням фахової термінології.

Але, оригінальність проведеного дослідження та методологічних підходів до розв'язання поставлених завдань, складність самого предмету дослідження, суб'єктивне розуміння опонентом деяких моментів дисертації зумовлюють виникнення низки **зауважень та питань**, які потребують пояснення:

1. На стор. 72 автор допускає вираз *«неаналітичність робочого процесу дизеля»*, який на нашу думку є некоректним. Навпаки, успішному аналізу робочого процесу дизеля присвячено дуже велику кількість наукових досліджень, починаючи з моменту створення цього агрегату наприкінці XIX сторіччя.

2. У підрозділі 2.5 дисертації на стор. 139-142 наведено статичну математичну модель дизеля. Попри те, що на 72 стор. автор каже (й справедливо): *«пошуки шляхів підвищення енергоефективності не можуть вестися чисто емпіричним шляхом»*, наведена матмодель дизеля є суто емпіричною, з використанням низки недетермінованих коефіцієнтів.

3. Наведене на стор. 143 рівняння (2.114) містить передаточну функцію першого порядку, що використовується для опису руху дизеля без наддуву. Для дизеля з наддувом вона повинна мати другий порядок.

4. У п. 3.2.5 на стор. 166-167 наведено невірне визначення ефективного (чи якогось іншого) ККД *«дизельного мотора»*. Ефективний ККД – це відношення кількості відданої споживачу енергії до кількості внесеної у циліндри з паливом хімічної енергії згоряння. До речі, не залежно від природи ККД, їх порівняння, взаємоурахування, адитивність в єдиній системі не є *невірними*, як пише автор, а навпаки, тільки урахування ефективного ККД дизеля дає змогу визначити ефективність перетворення хімічної енергії палива у електричну та, через неї, у механічну енергію для всієї дизель-електричної системи.

5. На початку підрозділу 3.3 на стор. 173-175 у вигляді графіків наведені поля межових значень ККД дизелів, з даними яких не можна погодитись за такими причинами. По-перше, по суті це є навантажувальні характеристики, а як свідчить теорія ДВЗ, за навантажувальною

характеристикою ефективний ККД дизеля швидко збільшується від нуля до максимального значення при 70-85% навантаження, а потім декілька (незначно) зменшується. По-друге, сучасні дизелі мають максимальне значення ККД на рівні 35-50% (нижня границя відноситься до малолітражних дизелів без наддуву, верхня – тихохідні судові дизелі). Ці свідчення не співпадають ані з якісною, ані з кількісною картиною на вказаних графіках.

6. У формулюванні об'єкту досліджень автором допущено тавтологію стосовно енергетичних процесів, що досліджуються в роботі, а при цьому в не включені термодинамічні, хімічні процеси, які мають місце в дизелі.

7. Відомо, що тепловозний дизель обов'язково обладнається не тільки регулятором частоти обертання, а й регулятором потужності. У запропонованій структурній схемі енергетичної установки на рис. 3.47 (стор. 235) він відсутній. Проте на стор. 280 автор сам наводить доказ необхідності використання регулятора потужності. У текстовому поясненні до цієї ж схеми (рис. 3.47) на стор. 236 аббревіатура «ДЗД» розшифровується як «*давач навантаження дизеля*», а далі по тексту як датчик «*швидкості обертання вала дизеля*».

8. В тексті дисертації нажалі не надано детального опису або схеми системи керування саме дизелем. Це призводить до виникнення таких питань до автора: Яким виконавчим механізмом реалізовано керування паливоподачею? Чому не розглянуто можливості керування такими параметрами дизеля, як кут випередження впорскування, тиск наддуву, температурний стан тощо, які мають суттєвий вплив на ефективність робочого процесу двигуна, адже їх оптимальні значення також залежать від обраного режиму роботи?

Висновок

Наведені зауваження не впливають на високу оцінку дисертаційної роботи Д.О. Кулагіна й не знижують її наукової та практичної цінності для галузі електричної інженерії. Висловлені побажання є дискусійними та спрямовані на привернення уваги дисертанта до продовження наукових робіт за його тематикою дослідження.

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації мають достатнє теоретичне, методологічне та емпіричне обґрунтування. Це обумовлене великою кількістю проаналізованих здобувачем джерел та реальних фізичних та польових експериментів, апробацією результатів дослідження на науково-практичних конференціях, а також використанням сучасних загальнонаукових і конкретно-наукових методів дослідження.

Тема дисертації є актуальною, її структура – продуманою, а матеріал викладений логічно та послідовно. Отримані в роботі наукові результати в сукупності розв'язують важливу наукову проблему 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. Робота виконана на високому теоретико-методологічному рівні, є цілісною та завершеною.

Зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки (пункти 1, 2, 4, 8) та галузі знань 14 – Електрична інженерія.

Представлена до захисту дисертаційна робота Д.О. Кулагіна є самостійним, оригінальним закінченим науковим дослідженням, яке містить раніше не захищені наукові положення, отримані автором нові науково обґрунтовані результати в галузі знань з електричної інженерії.

Дисертація та її автореферат оформлені відповідно до вимог державного стандарту, за своєю структурою та стилем викладення матеріалу відповідає чинним вимогам. Зміст роботи та завдання відповідають паспорту п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними Постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р. і Наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р.), які висуваються до докторських дисертацій, а Кулагін Дмитро Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки (галузь знань 14 – Електрична інженерія).

Офіційний опонент
завідувач кафедри
Двигунів внутрішнього згоряння
Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету,
доктор технічних наук, професор

«20» листопада 2020 р.

А.О. Прохоренко



ВІД ИС
ЗАСВІДОУВЧЕННЯ
СЕРІЙНИЙ № 168

Прохоренко А.О.