**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**«ПІДВИЩЕННЯ енергетичної ефективності ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНих електромеханічних систем транспортних засобів»**

**КУЛАГІН Дмитро Олександрович –** професор кафедри електропостачання промислових підприємств Запорізького національного технічного університету, кандидат технічних наук, доцент

РЕФЕРАТ

Запоріжжя – 2017

**Актуальність теми**. Транспортні засоби займають провідне місце в задоволенні потреб виробничої сфери та агропромислового комплексу у перевезеннях і є важливим фактором забезпечення сталого економічного розвитку даних галузей. При цьому агропромисловий комплекс є однією із найбільш транспортоємних галузей народного господарства. Середньорічний обсяг перевезень вантажів у сільському господарстві України становить 31 т на 1 га ріллі. В даний час в нашій державі транспортними роботами зайнято 35 % працівників сільськогосподарського виробництва України, а витрати праці на транспортні роботи від загальної трудомісткості обробки і прибирання продукції комплексу становлять до 70 %. В середньому по агропромисловому комплексу України витрати на транспортні роботи складають 45 % собівартості продукції, витрати на паливно-мастильні матеріали до 50 % вартості транспортних робіт, а енергетичні витрати на їх виконання досягають 55 % сукупної енергоємності виробництва галузі. Значне стале зростання цін на паливно-мастильні матеріали при цьому призводить до зменшення конкурентоспроможності вітчизняної сільськогосподарської продукції.

Для розв’язання **народногосподарської проблеми** зниження енергетичних витрат транспортної галузі агропромислового комплексу та виробничої сфери України важливою є задача підвищення енергетичної ефективності парку машинно-тракторних агрегатів, для вирішення якої досліджуються та створюються сучасні конструкції мобільних енергетичних засобів та джерел енергії для них, зокрема проводиться встановлення електричних трансмісій на базі сучасної перетворювальної техніки. Об’єктивними перевагами транспортних засобів з електричними трансмісіями є зменшення експлуатаційних витрат до 40%, зниження кількості шкідливих викидів до 25%, менший рівень шуму, відносна безпека для сільськогосподарських угідь. Але на сьогодні ще існує **науково-прикладна проблема** зменшення енергоємності дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів, яка ускладнює розв’язок вказаної народногосподарської проблеми. 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).

Вирішення задачі підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів в умовах складної ситуації на ринку енергетичних ресурсів України та надання пріоритетності розвитку агропромислового комплексу України дозволяє забезпечити зростання незалежності вітчизняних агропромислової та виробничої сфери від цілої низки економічних та політичних чинників, які мають значний влив на основні показники роботи багатьох підприємств даних галузей 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.

Варто відмітити, що вказана народногосподарська проблема носить комплексний, багаторівневий та багатокритеріальний характер. Її вирішення вимагає дослідження цілої низки складних науково-практичних задач, поєднання їх рішень в єдину систему взаємопов’язаного функціонування.

Отже, науково-прикладна задача роботи, яка напрямлена на зменшення енергоємності дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів є актуальною.

***Мета дослідження –*** підвищення енергоефективності дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів.

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

1. Дослідження методів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних електромеханічних систем за статичними характеристиками.

2. Дослідження методів підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних електромеханічних систем за динамічними характеристиками.

3. Аналіз енергетичної ефективності дизель-генераторних електромеханічних систем при застосуванні електричного гальмування на коротких дистанціях руху.

4. Підвищення адекватності систем керування дизель-генераторними електромеханічними системами реальним електромагнітним та електромеханічним процесам.

***Об’єктом дослідження***є електромеханічні та електромагнітні процеси перетворення енергії в дизель-генераторних електромеханічних системах.

***Предметом дослідження***є встановлення закономірностей між параметрами режимів роботи дизель-генераторних електромеханічних систем та показниками енергетичної ефективності з урахуванням взаємозв’язків між елементами системи.

**Наукова гіпотеза дослідження** полягає у припущенні, що у дизель-генераторних електромеханічних системах транспортних засобів кожен силовий елемент декомпозованої структури своїм режимом роботи має досягти мінімального рівня втрат енергії у всій дизель-генераторній електромеханічній системі в цілому, причому задачу загального керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку законів та алгоритмів взаємодії між компонентами даної складної ієрархічної електромеханічної системи. При цьому виконання певного визначеного алгоритму керування тяговим моментом електромеханічної системи з урахуванням всіх кінематичних параметрів руху забезпечує відповідну мінімізацію споживання паливно-енергетичних ресурсів.

***Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій*** підтверджується коректним застосуванням розроблених аналітичних методів, збіжністю результатів, отриманих з використанням розроблених методів та експериментальних досліджень***.***

***Методи дослідження.***Теоретичні положення роботи ґрунтуються на системному підході з використанням теорії електроприводів, теорії перетворювальної техніки, методів аналізу електричних машин, теорії створення систем керування автоматизованими процесами з використанням наступних відомих методів та підходів до проведення досліджень: синергетичний підхід; метод динамічних індуктивностей; метод узагальнених векторів; операторний метод; елементи теорії автоматичного керування; методи рішення диференціальних і трансцендентних рівнянь; математичний апарат варіаційного числення; концепція гнучких кінематичних траєкторій; методи математичного та імітаційного моделювання; метод експериментального дослідження.

***Наукові положення:***

1. Підвищення енергетичного потенціалу дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу за статичними характеристикамибазується на тому,що у такій системі кожен силовий елемент декомпозованої структури своїм режимом роботи має досягти мінімального рівня втрат енергії у всій дизель-генераторній електромеханічній системі в цілому, причому задачу керування такою системою необхідно формулювати як завдання пошуку законів та алгоритмів взаємодії між компонентами складної ієрархічної електромеханічної системи.

2. Виконання синергетичного термінального алгоритму енергоощадного керування тяговим моментом дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу з урахуванням всіх кінематичних параметрів руху та за умови мінімізації площі під кривою руху забезпечує найбільш раціональне споживання паливно-енергетичних ресурсів та підвищення неенергетичного потенціалу системи за динамічними характеристиками.

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

**Вперше:**

– запропоновано метод підвищення енергоефективності дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу за статичними та динамічними характеристиками, на основі якого на відміну від існуючих методів використовуються синергетичні властивості системи та за яким необхідно розглядати засоби забезпечення енергоефективного режиму роботи та керування кожним з елементів декомпозованої структури електромеханічної системи та загального закону керування цими елементами поодинці та у сукупності для досягнення найбільш раціонального питомого рівня споживання палива та максимізації ККД електромеханічної системи;

– запропоновано метод вибору структури дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу з можливістю накопичення енергії, який на відміну від існуючих методів враховує синергетичні властивості електромеханічної системи, що дозволяє забезпечити встановлені тягові характеристики за умови простоти побудови, високу ефективність використання енергії та забезпечує роботу дизель-генераторної установки на економічній характеристиці;

– запропоновано і обґрунтовано використання критерію мінімізації площі під кривою руху для розробки алгоритмів енергоощадної експлуатації електромеханічних систем транспортних засобів, який на відміну від існуючих критеріїв поєднує в собі раціональний розподіл між задачами мінімізації часу поїздки та витрат пального при цьому, забезпечує дотримання встановлених значень прискорення та ривка, що дозволяє досягти мінімальної питомої витрати палива та отримати при цьому граничне зменшені показника витрат палива до 6% та часу руху ділянкою до 3% в порівнянні з відомими алгоритмами керування;

– отримано функцію керування моментом тягових асинхронних двигунів при русі транспортного засобу на різних профілях шляху, яка на відміну від існуючих враховує параметри раціональної кривої руху транспортного засобу, що дозволяє виконувати керування станом двигунів для досягнення встановлених електромеханічних та електромагнітних показників дизель-генераторної електромеханічної системи при роботі на економічній характеристиці;

– запропоновано метод синтезу інформаційно-керуючої системи для виконання синергетичного термінального алгоритму енергоощадного керування дизель-генераторною електромеханічною системою транспортного засобу, який на відміну від існуючих алгоритмічних принципів побудови систем автоматичного керування засновано на положеннях концепції гнучких кінематичних траєкторій, зокрема, вперше поширено дану концепцію на новий клас систем – дизель-генераторні транспортні засоби з електромеханічною системою приводу змінного струму, що дозволяє реалізовувати визначені раніше види алгоритмів керування у разі відхилення від основної кривої руху, забезпечує економію палива, що дозволяє враховувати всі фазові обмеження, та тим самим підвищити рівень енергоефективності системи;

– запропоновано метод врахування форми кривої намагнічування асинхронного двигуна, який на відміну від існуючих розроблено на основі функції Бріллюена, що дозволяє за відомого передаточного коефіцієнта між значенням модуля вектора робочого потокозчеплення та намагнічуючого струму машини здійснювати опис кривих намагнічування тягових асинхронних двигунів максимально наближено до реальних кривих з граничним значенням похибки до 3%.

**Отримав подальший розвиток:**

– метод розробки інтелектуальних керуючих комплексів для електромеханічних систем в якому на відміну від існуючих методів поєднано нейронну мережу та засоби ройового інтелекту для забезпечення визначеної енергетичної характеристики дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу, що дозволяє отримувати встановлені енергетичні характеристики засобами електричної трансмісії, які відповідають вимогам перевізного процесу та забезпечують максимізацію енергетичного потенціалу системи;

– метод визначення режимів роботи дизель-генераторних електромеханічних систем в якому на відміну від існуючих методів враховано задані параметри з боку перевізного процесу, внаслідок чого отримано вимоги, засновані на синергетичній концепції керування, щодо особливостей побудови тягових електроприводів з урахуванням розподілу витрат енергії на тягові потреби та забезпечення власних потреб, що дозволяє визначити раціональну структуру електромеханічної системи;

– метод динамічних індуктивностей, який доопрацьовано у частині врахування електричної та магнітної несиметричності контурів машини і вперше поширено на новий клас систем – тягові асинхронні електроприводи змінного струму, що дозволяє підвищити точність результату врахування процесів насичення та зменшити рівень витрат через несиметричні електромагнітні процеси в обмотках машини до 6%.

Вказані наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати у галузі електротехнічних комплексів та систем у сукупності вносять вклад у розв'язок важливої науково-прикладної проблеми галузі – зменшення енергоємності дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів, а також розв’язання народногосподарської проблеми – зниження енергетичних витрат транспортної галузі агропромислового комплексу та виробничої сфери України.

***Практичне значення отриманих результатів:***

1. На основі методів підвищення енергоефективності дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу з урахуванням синергетичних властивостей системи визначено граничні величини приросту статичного коефіцієнта корисної дії розробленої системи, що дозволяє планувати та оцінювати заходи з підвищення енергоефективності електроприводу. В сукупності таке підвищення за рахунок використання синергетичних властивостей електромеханічної системи дозволяє збільшити загальний статичний ККД до 5% (для І групи з типовою потужністю до 70 кВт), до 7% (для ІІ групи з типовою потужністю 70 – 300 кВт) та до 8% (для ІІІ групи з типовою потужністю понад 300 кВт).

2. На основі дослідження витрат енергії дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів визначено структуру раціональних енергетичних діаграм, які дозволяють будувати системи автоматичного керування для забезпечення відповідних алгоритмів роботи, та дозволяють отримати економію паливних ресурсів на рівні до 6 %.

3. Використання запропонованої концепції вибору дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів з можливістю накопичення дозволяє виконувати проектування конструкції систем електропостачання транспортних засобів при забезпеченні сучасних підходів підвищення їх енергоефективності.

4. Визначено процедуру розрахунку параметрів раціональної кривої руху, що дозволяє будувати системи автоматичного керування дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів, проводити інженерні розрахунки та математичне моделювання системи керування тяговим електроприводом для мінімізації відхилення електротехнічного комплексу від графіка руху.

5. Виконано аналіз та узагальнення різних способів керування системою тягових електроприводів рухомого дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів на різних профілях шляху, що дозволяє проводити інженерно-проектні роботи на основі вказаних алгоритмів для побудови енергоощадних систем керування, проводити інженерні розрахунки та моделювання керуючої системи для всього діапазону режимів роботи тягових електроприводів.

6. Розроблений метод побудови моделей дизель-генераторних електромеханічних систем транспортних засобів з урахуванням процесів насичення та електричної і магнітної несиметричності контурів машини дозволяє проводити дослідження електромагнітних та електромеханічних характеристик комплексів, 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.

7. Використовуючи розроблений метод описання форми кривої намагнічування тягового асинхронного двигуна на основі функції Бріллюена побудовано уточнену модель тягової машини, яка є корисною для проведення інженерних проектних розрахунків, фізичного моделювання в дослідженнях при розробленні й удосконаленні конструкцій електромеханічних систем транспортних засобів, адже дозволяє отримати відхилення від дійсної кривої намагнічування на рівні не більше 3.4%.

***Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.*** Основні наукові результати роботи отримані автором при виконанні досліджень:

– на базі «НДІ«Перетворювач» в якості співвиконавця відповідно до госпдоговірної роботи з ВАТ ХК «Луганськтепловоз»;

– на базі Запорізького національного технічного університету в якості співвиконавця у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за темою ДБ № 01719 від 01 вересня 2009 року «Розробка методів оптимізації систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і ЕТУ» (номер держреєстрації 0109U007668);

* на базі Запорізького національного технічного університету в якості співвиконавця у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за темою ДБ № 03712 від 01 вересня 2012 року «Розробка заходів для підвищення ефективності експлуатації й проектування систем електропостачання та ЕТУ» (номер держреєстрації 0112U005347);
* на базі Запорізького національного технічного університету в якості співвиконавця у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за темою № 03715 від 01 вересня 2015 року «Оптимізація систем електропостачання та ЕТУ з метою енергозбереження та покращення експлуатаційних характеристик» (номер держреєстрації 0115U004673);
* на базі Запорізького національного технічного університету 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);
* на базі Запорізького національного технічного університету у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03415 «Розробка та дослідження напівпровідникових перетворювачів для електроприводу за схемою струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду», де автор є співвиконавцем (номер держреєстрації 0115U002566);
* в рамках госпдоговірної роботи за темою ГБ № 03714 від 01 вересня 2014 р. з ВАТ «МТЗ», де автор є провідним виконавцем.

***Основні наукові положення і результати роботи впроваджено:***

– у ТОВ «НДІ«Перетворювач» (м. Запоріжжя) при розробці серійних перетворювачів частоти для електроприводів змінного струму у вигляді:

1. Методу врахування процесів насичення асинхронних двигунів.

2. Методу описання форми кривої намагнічування асинхронного двигуна на основі функції Бріллюена.

3. Методу визначення кривої руху електротехнічного комплексу для визначення необхідної послідовності керуючих сигналів при побудові керуючої системи тягових електроприводів.

4. Алгоритму дослідження енергетичних резервів автономного електрорухомого складу для здійснення процесу накопичення;

– на Запорізькому комунальному підприємстві міського електротранспорту «ЗАПОРІЖЕЛЕТРОТРАНС» в службах електрогосподарства та руху для підготовки технічних документів, проведення наукових та організаційних заходів з питань перспектив накопичення електричної енергії при застосуванні рекуперативного гальмування на електрорухомому складі міського електротранспорту м. Запоріжжя;

– у навчальному процесі Запорізького національного технічного університету для студентів спеціальностей 7.05070108 Енергетичний менеджмент та 7(8).05070103 Електротехнічні системи електроспоживання 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 Запорізького національного технічного університету при виконанні плану наукових досліджень за темою ДБ № 01719 від 01 вересня 2009 року «Розробка методів оптимізації систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і ЕТУ» (номер держреєстрації 0109U007668) та 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 ДБ № 03715 від 01 вересня 2015 року «Оптимізація систем електропостачання та ЕТУ з метою енергозбереження та покращення експлуатаційних характеристик» (номер держреєстрації 0115U004673), за темою ДБ 03715 «Енергоощадне керування експлуатаційними характеристиками та параметрами систем електричної тяги автономного електрорухомого складу» (номер держреєстрації 0115U002567), за темою ДБ 03715 «Розробка та дослідження напівпровідникових перетворювачів для електроприводу за схемою струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду», (номер держреєстрації 0115U002566);
* у науково-дослідній роботі фахівців Національної металургійної академії України (м. Дніпропетровськ) при виконанні плану наукових досліджень за темою ДБ від 01 вересня 2006 року «Методологія управління підприємствами різних організаційно-правових форм та форм власності» (номер держреєстрації 0107U001146).

Впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами про використання результатів дослідження організаціями, підприємствами, науковими установами та навчальними закладами.

***Особистий внесок автора.*** Всі основні положення і результати дослідження отримані автором самостійно.

***Публікації.*** Результати роботи опубліковано в 89 друкованій науковій праці, у тому числі: 6 монографіях, 40 статтях у фахових виданнях (з них 7 статей у зарубіжних фахових наукових виданнях, 35 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, включаючи 4 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), в 20 матеріалах конференцій та захищені 22 патентами України на винаходи і корисні моделі та авторськими свідоцтвами.

Загальна кількість посилань на публікації автора складає 18, h-індекс Google Shcolar = 3 (згідно баз даних Google Shcolar) та h-індекс SCOPUS = 1 (згідно баз даних SCOPUS).

За матеріалами роботи підготовано докторську дисертацію.

Професор кафедри електропостачання

промислових підприємств ЗНТУ, к.т.н., доцент Д.О. Кулагін