

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОВЕДЕННЯ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РУХОМИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Кулагін Д. О., Яценко Д. В.

1. Вступ

Вдосконаленню окремих елементів дизель-генераторної електромеханічної системи присвячено значну кількість робіт. Наприклад, в [1–4] показано взаємний вплив окремих груп елементів загальнопромислових електроприводів, зокрема перетворювач-тяговий двигун, тяговий двигун-редуктор на загальний потенціал енергетичної ефективності за статичними характеристиками. Проте, електроприводи транспортних засобів є більш складними за структурою, містять більшу кількість груп поєднаних між собою елементів. Отже вони можуть мати більший енергетичний потенціал в разі виявлення взаємного впливу між групами даних елементів за статичними характеристиками.

Вирішити завдання підвищення енергетичного потенціалу електромеханічної системи можливо тільки комплексно. При цьому необхідно розглядати 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 електромеханічної системи та оптимальне керування ними не призводить до роботи всієї системи на економічній характеристиці. Це, як наслідок, збільшує споживання рівня дизельного палива. І навпаки, штучний примус роботи дизеля на економічній характеристиці призводить до роботи вказаних електричних елементів всієї електромеханічної системи зі значними втратами потужності.

Використання комплексного, взаємопов'язаного підходу, за якого обирається найбільш енергоефективний режим роботи всієї системи, дозволить вирішити вказану проблему. Причому кожний елемент системи працюватиме у найбільш енергетично ощадному режимі, котрий є тільки можливим за такого стану електромеханічної системи. Це можливо виконати з урахуванням синергетичних властивостей електромеханічної системи.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є системи тягових електроприводів рухомих електротехнічних комплексів на основі різних типів двигунів.

При виборі структури тягового електроприводу рухомого електротехнічного комплексу необхідно виходити з положення, що первинна силова установка, тяговий генератор, тяговий перетворювач, система власних потреб, тяговий двигун та пара редуктор – колесо розглядаються не як окремі компоненти чи підсистеми для підвищення їх енергетичного потенціалу. Вони є складовими частинами всього тягового електроприводу, енергетичний потенціал якого по-

винен максимізуватись за обраними принципами лише в цілому. При цьому рішення окремих завдань щодо даних підсистем є необхідним лише для забезпечення вибору раціональних показників роботи всього тягового електроприводу.

Відомо, що електромеханічна система є синергетичною [1]. Синергетична концепція підвищення енергоефективності дизель-генераторної системи транспортного засобу базується на тому, що у такій системі кожен силовий елемент призначені максимізувати свої техніко-економічні показники. При цьому кожний елемент повинен компенсувати недоліки один одного, та підвищити енергетичний потенціал всієї дизель-генераторної електромеханічної системи. Для встановлення меж підвищення енергетичного потенціалу системи першочерговим є завдання зворотної декомпозиції електромеханічної системи та встановлення взаємозв'язку між енергетичним потенціалом отриманих підсистем та всієї системи в цілому.

Відповідно до синергетичного підходу та методу декомпозиції будемо розглядати елементи складної ієрархічної структури електромеханічної системи – синхронний генератор, перетворювач, тяговий двигун, редуктор, колесо, систему керування як окремі підсистеми. Дані підсистеми підпорядковані одна одній і між ними існує взаємний вплив.

Для використання синергетичних властивостей електромеханічної системи 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 електромеханічної структури.

Отже, надалі будемо розглядати методи забезпечення енергоефективного режиму роботи кожного з елементів ієрархічної структури електромеханічної системи поодиноці та у сукупності. Це необхідно для досягнення найбільш раціонального рівня споживання дизельного палива при встановленні технологічних показників роботи всього транспортного засобу. Виконаємо декомпозицію типової послідовної структури дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу, зображену на рис. 1.

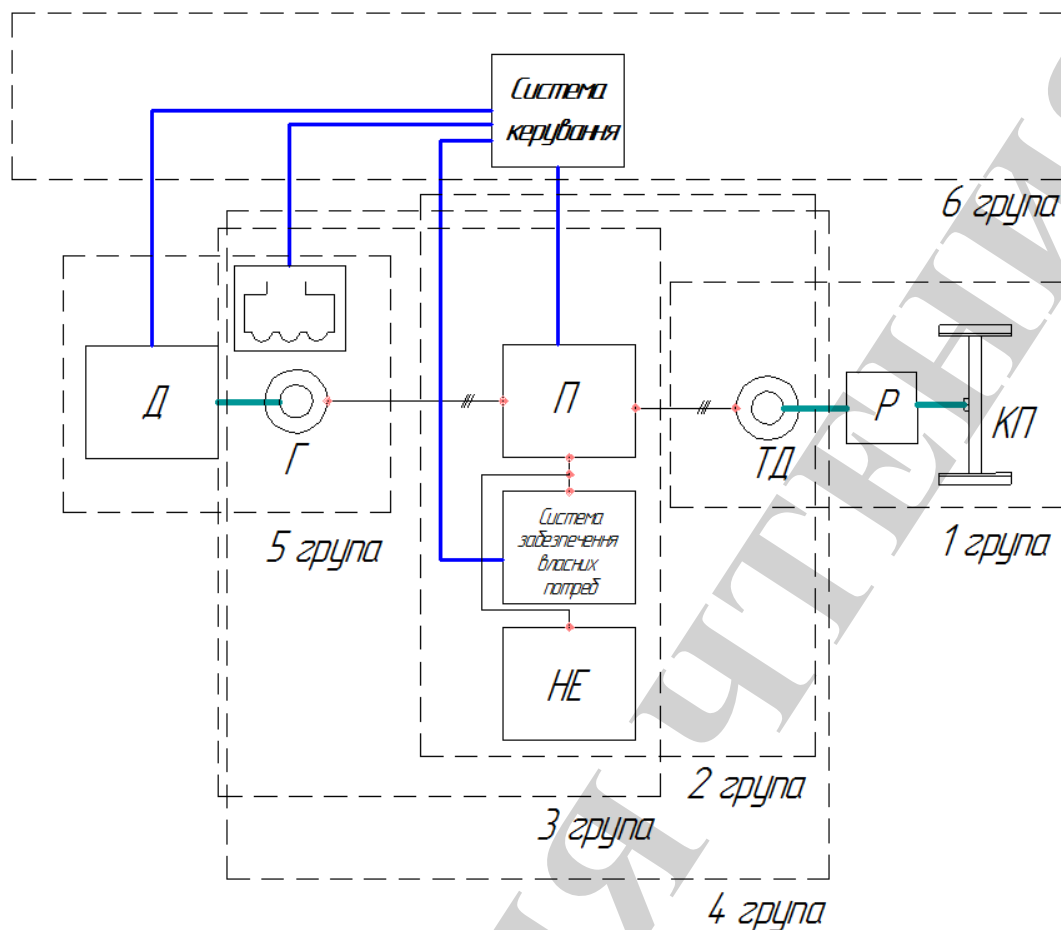


Рис. 1. Структурна схема дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу

На рис. 1 Д – дизель, Г – генератор, НЕ – накопичувальний елемент, П – перетворювач, ТД – тяговий двигун, Р – редуктор, КП – колісна пара.

3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за *мету* визначення особливостей проведення декомпозиції систем тягових електроприводів для різних видів та конструкцій рухомих електротехнічних комплексів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Аналіз практичного досвіду декомпозиції систем тягових електроприводів.
2. Узагальнення методики декомпозиції структури та параметрів тягових електроприводів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Основна ідея теорії складних систем полягає в тому, що поведінку цілого не можна передбачити з властивостей його частин. Так само впливаючи на кожну частину системи окремо не можна досягти максимального ефекту для всієї системи взагалі. Взаємодія між елементами системи вносить значний вплив на роботу всієї системи. Це властивість систем називається «емерджентність»: ці-

ле відрізняється від суми складових його частин, тому що головне – це те, як протікає взаємодія між частинами. Притому ці взаємодії можуть підкорятися дуже простим правилам. Тому складні системи необхідно розглядати лише у сукупності, використовуючи метод для оптимізації складних систем – синергетичний метод, який в останній час поодинокі, але дуже ефективно використовується для мехатронних систем. Завдяки широкому застосуванню результатів досліджень з мехатроніки сьогодні на транспорті можна виділити спеціальний напрям розвитку цієї галузі науки – транспортну мехатроніку [1]. Вона присвячена аналізу проблем сполучення та організації взаємодії транспортних електромеханічних й електронних вузлів, агрегатів та телематичних приладів та систем у процесі експлуатації транспортних машин для отримання синергетичного ефекту [2]. Тому мехатроніка та телематика на основі синергетики транспортних машин та систем є основною складовою новітніх інформаційно-комунікаційних технологій.

Будь-яка транспортна машина чи система є сукупністю приладів, пристроїв, вузлів та агрегатів, що об'єднують технічні засоби для забезпечення технологій:

- механічної (процес пересування машин у просторі та часі);
- електронної (процес керування рухом);
- інформаційної (процес обробки даних про стан середовища руху).

Відповідно слід розглядати транспортні системи та технології, як мехатронні системи та об'єкти. Цей напрям досліджень вивчає нове наукове спрямування – мехатроніка [3], яка знайшла широке використання на автомобільному транспорті [4]. Не кожна транспортна машина або система на достатньому рівні відповідає визначенню мехатронної системи. По-перше, така система повинна мати властивість автономності. По-друге, мехатронна система відрізняється розумною (англ. smart) поведінкою. Властивість мехатронної системи, транспортної машини або автомобіля бути «розумним» можна досягти або отримати завдяки застосуванню сучасних технологій штучного інтелекту на основі нейронних мереж [1, 5].

Конкурентоспроможний транспортний засіб сьогодні можна розробити лише за схемою гібридного електромобіля з синергетичною силовою установкою, що включає двигун внутрішнього згорання, електричний двигун і буферний накопичувач енергії [4, 6]. Дослідження фахівців [4, 7] підтверджують техніко-економічну доцільність створення такого синергетичного електромобіля, який більш ніж у два рази більш економічний ніж базовий автомобіль з традиційним двигуном внутрішнього згорання. Проте, перспективний синергетичний принцип досі не розвинуто для дизель-генераторних електромеханічних систем широкого спектру потужностей.

Характерною особливістю досліджень провідних наукових шкіл у останні десятиріччя є неодмінний розвиток проблем керування паралельно з традиційними дослідженнями засобів перетворення, що складає достатню умову для виконання синергетичних оптимізаційних заходів [8, 9]. В роботах [4, 10, 11] запропонована концепція системного дослідження енергетичних показників

об'єкту керування, як необхідна умова вирішення оптимізаційних задач, яка ґрунтується на таких положеннях:

– автономні транспортні системи електроживлення з перетворювачами постійної напруги є замкненими структурами. Вони мають аналізуватися у всій сукупності взаємовпливу та взаємозв'язків усіх структурних компонентів. Тобто дослідженню підлягає базова структура: «акумуляторна батарея – імпульсний перетворювач – тяговий електродвигун»;

– дослідження та аналіз систем тягового електрообладнання має бути охоплений єдиним математичним описом, що містить функціональний зв'язок режимних характеристик, параметрів управління та енергетичних показників цих систем;

– з енергетичних показників (ККД, спожита потужність, втрати потужності, тощо), залежність яких від параметрів управління вивчатиметься, перевагу слід віддати саме ККД. Адже найбільш загальному показнику енергетичної ефективності як окремих компонентів, так і системи привода в цілому.

Основними напрямками синергетичного підвищення ефективності функціонування автономних електротранспортних засобів, покращення їх експлуатаційних характеристик є раціональна організація процесів перетворення енергії первинного джерела та забезпечення ефективного загального енергообміну у транспортних системах енергоживлення. За такої постановки задачі її вирішення базується на всебічному дослідженні залежностей енергетичних показників транспортних систем енергоживлення від параметрів управління та навантаження з обов'язковим врахуванням обмежень, що накладають первинні джерела.

Відомі дослідження, існуючі методи та засоби підвищення ефективності здебільшого стосуються окремих компонентів таких систем і не завжди забезпечують синергетичне підвищення ефективності систем в цілому, що стримує розвиток автономного електротранспорту [4]. З цього випливає необхідність подальшого розвитку наукових досліджень енергетичних показників систем енергоживлення на основі синергетичного системного аналізу транспортних електроприводів, розвитку синергетичної методології раціональної побудови їх структури, синергетичних методів та засобів керування елементами таких систем. Це забезпечить зменшення питомих енерговитрат, збільшення ККД, покращення експлуатаційних, надійнісних та ергономічних показників автономного електротранспорту [1, 4].

Великий внесок у вирішення проблеми підвищення ефективності систем електричного живлення автономного електротранспорту зроблено науковцями лабораторії електромобілів Інституту електродинаміки (м. Київ, Україна). Тут була розроблена методологія, що дозволяє виконати дослідження енергетичної ефективності систем енергоживлення таких транспортних засобів з точки зору ККД як поелементно, так і на системному рівні. За допомогою цієї методології було проаналізовано низку схем як тягового, так і допоміжного електрообладнання електромобілів [12]. Зокрема, авторами [12] за допомогою цієї методології було проведено аналіз енергетичних показників систем електричного живлення автономного електротранспорту комбінованого широтно-імпульсного регулятора та силового перетворювача для джерел живлення низьковольтних бортових споживачів. Отримані залежності ККД окремих елементів та систем

електричного живлення автономного електротранспорту в цілому від параметрів керування та навантаження. Також визначені рекомендації щодо оптимального, з точки зору загального ККД систем електричного живлення автономного електротранспорту, управління такими системами.

Основними напрямками підвищення ефективності функціонування автономних електротранспортних засобів, покращення їх експлуатаційних характеристик є раціональна організація процесів перетворення енергії первинного джерела та забезпечення ефективного загального енергообміну у транспортних системах енергоживлення. За такої постановки задачі її вирішення базується на всебічному дослідженні залежностей енергетичних показників транспортних систем енергоживлення від параметрів управління та навантаження з обов'язковим врахуванням обмежень, що накладають первинні джерела.

Основним питанням під час побудови енергоефективних структур дизель-генераторних систем є оптимізація використання потужності, що споживається системою від дизеля. Це призведе до зменшення рівня втрат та забезпечення споживання потужності всією електромеханічною системою на найменшому рівні. Проблема зменшення рівня втрат, тобто підвищення ККД в таких системах привертає увагу багатьох дослідників [1–7]. Пропонуються різні способи її розв'язку, патентуються досить численні винаходи, які дозволяють у ряді випадків зменшити рівень втрат потужності. Однак та обставина, що жоден із цих способів не ввійшов широко в практику дизель-генераторних систем, свідчить про те, що багато спроб поліпшення рівня енергоефективності мають невисокий ефект. Як правило, виграш у ККД здобувається ціною значного ускладнення конструкції електромеханічної системи, введення додаткових ланок. Залишаються невідомими також границі застосовності даних способів. Практична реалізація багатьох способів упирається в неможливість передбачити деякі побічні явища, що виявляють вирішальне значення на використання способу.

На сьогодні фактично відсутня система класифікації дизель-генераторних електромеханічних систем за потужністю. Вона є потрібною для дослідження показників роботи машин за статичними характеристиками. Для переважної більшості транспортних машин та рухомого складу залізниць виникає питання необхідності її створення. За основу приймемо тягову класифікацію, яка використовується в тракторній галузі.

Відповідно до колишніх ГОСТ 27021-86 чи СТ СЭВ 628-85 типорозмірний ряд сільськогосподарських тракторів включав 10 тягових класів. Він представляв собою зростаючу послідовність безрозмірних чисел (0,2...8), кожне із яких виражало значення номінального тягового зусилля трактора ($P_{крн}$) в тонах [13].

У міжнародній практиці у відповідності до стандартів ISO 730/1 і ISO 730/3-82 використовується класифікація тракторів за максимальною тяговою потужністю $N_{кр,max}$. Вона отримується при випробуванні енергетичного засобу на гладкій горизонтальній і сухій бетонованій поверхні, або поверхні, покритої скошеною/нескошеною травою [13]. Трактори при цьому поділяються на чотири категорії, кожна з яких відповідним чином співвідноситься з класифікацією енергетичних засобів згідно з міжнародним стандартом ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85) [13].

Практика показує, що класифікація згідно з ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85) дає більш точну уяву про експлуатаційні властивості трактора [13]. А це, у свою чергу, дозволяє правильно підібрати до нього комплекс сільськогосподарських машин і знарядь. Проте, для узагальнення та класифікації основних заходів підвищення енергетичного потенціалу для елементів декомпозованої структури така класифікація дизель-генераторних транспортних засобів є занадто детальною, оскільки в більшості з даних класів підходи будуть однаковими. Дана детальна класифікація є корисною для правильного підбору до відповідного трактора комплексу сільськогосподарських машин і знарядь та проведення відповідних проектних та тягових розрахунків. Також вона знадобиться при визначенні відповідної експлуатаційної ваги трактора, номінального тягового зусилля та допуску на його коливання, норми буксування енергетичного засобу при визначенні його номінального тягового зусилля.

5. Методи досліджень

Для досягнення задачі керування складною електромеханічною системою важливий потенціал не кожного окремого елемента електроприводу, а потенціал їх сукупності при взаємодії. При вдалому поєднанні взаємодії та режимів роботи кожного елемента та всієї структури взагалі загальний потенціал енергозбереження цілого більший суми потенціалів енергозбереження окремих елементів електроприводу. В результаті отримуємо ефект синергії. Синергія, від грецького *synergos*, означає узгоджений, взаємодіючий. Закон синергії стверджує, що сума властивостей організованого цілого більше арифметичної суми властивостей його елементів. Одержуваний сумарний ефект носить назву синергетичного. Завдання алгоритму керування – оптимізувати взаємодію ресурсів для отримання позитивного ефекту синергії, ефекту зменшення рівня втрат в системі.

Основними резервами синергетичного підвищення енергоефективності дизель-генераторних електромеханічних систем є методи підвищення ККД елементів електромеханічної структури, режими керування транспортним засобом та алгоритми керування елементами структури.

Визначимо, що базуючись на підході синергетичного підвищення енергоефективності дизель-генераторної електромеханічної системи транспортного засобу первинним заходом підвищення енергоефективності є розробка концепції вибору структури системи з використанням синергетичного підходу. Основним засобом підвищення енергоефективності дизель-генераторної електромеханічної системи є застосування електричного гальмування з використанням рекуперативного накопичення або перерозподілу енергії. Основні резерви підвищення енергоефективності становлять відповідні комплексні алгоритми керування, засновані на синергетичному принципі. При цьому підвищення точності та адекватності систем керування дизель-генераторними електромеханічними системами дозволяє забезпечити виконання завдання створення параметрів еталонного руху, що задовольняють оптимальному за тим чи іншим критерієм руху. Особливу увагу потрібно приділити також засобам реалізації розроблених алгоритмів керування, що дозволить максимально точно відпрацювати створені алгоритми керування.

Методики, застосовувані для оптимізації енергосистем, досить складні, більшість із них базується на умові рівності відносних приростів витрати палива, що є тільки необхідною умовою існування екстремуму. Для врахування обмежень застосовується метод штрафних функцій, що допускає можливість розрахунків тільки з використанням ЕОМ. Методи динамічного програмування, гілок і границь також достатньо складні й вимагають використання ЕОМ. Найбільш відомим методом для оптимізації паралельно працюючих дизельних установок є метод [1, 4]. Метод легко застосовується для двигунів з ідентичними навантажувальними характеристиками й досить складний для агрегатів з різними характеристиками. Крім цього при розробці критерію оптимальності за даним методом не накладаються обмеження на потужності агрегатів. Метод не дає математичного обґрунтування вибору складу працюючих агрегатів [1, 4].

6. Результати дослідження

Максимальний ефект з підвищення енергетичного потенціалу можливо досягти розглядаючи групи підсистем вказаної електромеханічної системи транспортного засобу. В цих групах відбувається перетворення одних видів енергії в інші та відповідні регулювання фізичних характеристик цих видів енергії. Для цього виконаємо декомпозицію структурної схеми електромеханічної системи, представлена на рис. 1, на відповідні групи:

- 1 група: тяговий двигун – редуктор – колісна пара;
- 2 група: перетворювач – тяговий двигун;
- 3 група: генератор – перетворювач;
- 4 група: генератор – перетворювач – тяговий двигун;
- 5 група: дизель – генератор;
- 6 група: загальна система керування всіма ланками та системою в цілому.

Для аналізу та узагальнення засобів підвищення енергетичного потенціалу за статичними характеристиками, виконаємо класифікацію дизель-генераторних електромеханічних систем в залежності від потужності (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація дизель-генераторних електромеханічних систем по тяговим категоріям

Категорія потужності	Тягова потужність, кВт	Частина споживання загальної потужності на забезпечення власних потреб	Види дизель-генераторних транспортних засобів, що належать до даної категорії потужності
1	2	3	4
I	до 70	4–30 % (живлення в основному від допоміжних генераторів)	– міні-трактори; – навантажувачі; – легкі самохідні шасі; – трактори до класу 2; – легка будівельна техніка; – легка дорожня техніка; – допоміжні машини та самохідні установки залізниць

1	2	3	4
II	70–300	6–25 % (живлення від допоміжних генераторів або шини постійного струму)	<ul style="list-style-type: none"> – трактори класів 3–8; – будівельна та дорожня техніка; – рейкові автобуси; – допоміжні машини та самохідні установки залізниць; – автотриси; – будівельна та дорожня техніка; – допоміжні кар'єрні транспортні засоби; – локомотиви; – міський транспорт
III	більше 300	8–20 % (живлення в основному від шини постійного струму)	<ul style="list-style-type: none"> – трактори класів більше 8; – комбайни; – локомотиви; – важка будівельна та дорожня техніка; – кар'єрні самоскиди; – приміський рухомий склад; – маневровий рухомий склад

Запропонована класифікація охоплює всі основні категорії дизель-генераторних електромеханічних систем по тяговим класам, для яких властиві ті чи інші уніфіковані підходи.

Прийнята структура електромеханічної системи та наведена класифікація за тяговими категоріями є типовою як для систем змінного струму, так і для систем постійного струму.

Виконаємо узагальнення основних структур елементів декомпозованої системи відповідно до запропонованої класифікації, взаємозв'язок між якими дозволяє максимально використати синергетичні властивості електромеханічної системи.

Варіанти структур групи «тяговий двигун – редуктор» наведено в табл. 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)			Не характерна для данного класу
Тяговий двигун спеціальної конструкції – Редуктор	Не характерна для данного класу		

Варіанти структур групи «перетворювач – тяговий двигун» наведено в табл. 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	Не характерна для данного класу		
4q-перетворювач – Тяговий двигун	Не характерна для данного класу		
Використання накопичувача енергії			

Варіанти структур групи «генератор – перетворювач» наведено в табл. 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			Не характерна для данного класу
Генератор – Накопичувальна система – Перетворювач			

Варіанти структур групи «генератор – перетворювач – тяговий двигун» наведено в табл. 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)		Не характерна для данного класу	Не характерна для данного класу
Генератор – Перетворювач – Загальна шина постійного струму			
Генератор – Перетворювач – Загальна шина постійного струму з накопичувальною системою			

Варіанти структур групи «дизель – генератор» наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Варіанти структур групи «дизель – генератор»

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

Приведена класифікація структур показує єдність між підходами щодо дизель-генераторних електромеханічних систем змінного та постійного струмів, що дозволяє уніфікувати пропоновані заходи та розповсюджувати їх на більш широкий клас транспортних засобів. З огляду на перспективність побудови електромеханічних систем на основі змінного струму, надалі будемо розглядати взаємний зв'язок між вказаними групами на основі електроприводу з асинхронним двигуном.

Припустімо, що P являє собою множину всіх можливих засобів з підвищення енергетичної ефективності електромеханічної системи. При цьому множина P має таку властивість, що певні її складові підмножини можна використовувати одночасно, а інші підмножини лише поодиноці, 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 – колісна пара» (табл. 2);
- підмножина P_2 включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «перетворювач – тяговий двигун» (табл. 3);
- підмножина P_3 включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «синхронний генератор-перетворювач» (табл. 4);
- підмножина P_4 включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «синхронний генератор – перетворювач – тяговий двигун» (табл. 5);
- підмножина P_5 включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «дизель – синхронний генератор» (табл. 6);
- підмножина P_6 включає в себе засоби, які буде впроваджено в підсистемі «загальна система керування всіма ланками та системою в цілому».

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 (табл. 2);
- підмножина P_2 включає в себе z_2 засобів (табл. 3);
- підмножина P_3 включає в себе z_3 засобів (табл. 4);
- підмножина P_4 включає в себе z_4 засобів (табл. 5);
- підмножина P_5 включає в себе z_5 засобів (табл. 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 $M(n)$ містить елементи, які дорівнюють 0 в разі, коли відповідний захід з підвищення енергетичного потенціалу відхилено або 1 в протилежному випадку.

Рішення задачі вибору засобів з підвищення енергетичного потенціалу дизель-генераторної електромеханічної системи необхідно виконувати послідовно, по-перше сформувавши множину всіх можливих засобів з підвищення енергетичної ефективності електромеханічної системи. По-друге необхідно провести вибір комбінацій варіантів підмножин засобів. По-третє потрібно встановити відповідну цільову функцію, а також визначити обмеження та межові умови.

Сформулюємо математичну модель для вказаної задачі пошуку засобів підвищення енергетичного потенціалу системи за статичним характеристиками запишемо в наступному вигляді:

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

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 електромеханічної системи від потужності.

Сукупність усіх технічних і схемних модифікацій кожної групи декомпонованої структури, і являє собою необхідний перелік заходів, які необхідно здійснити для максимальної економії палива. 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.

Повна одночасна заміна всього складу устаткування системи і компонування нових схем може бути економічно недоцільною, незважаючи на максимальний ефект від зниження втрат палива. Це зумовлено існуючою політикою цін на енергоресурси і устаткування. Таким чином, виникає завдання виявлення початкового заходу або частини тих заходів, які максимально б наблизили систему до максимального енергетичного потенціалу, але при цьому були б припустимі з економічних міркувань.

Існуючі системи транспортних засобів аналогічні по своїй структурі та параметрам, тому що створюються на принципах типізації та уніфікації проектних розв'язків. Проте, режимні ж параметри їх можуть відрізнятися, що обумовлено технологічними особливостями об'єкта. Отже, будуть і різні орієнтири в процесі підвищення енергетичного потенціалу.

Слід розуміти, що для одержання граничної величини підвищення енергетичного потенціалу в системі згідно з результатами розробки потрібна деяка сукупність впливів на неї. Також на граничне значення резерву в системах впливає кількість електромеханічних систем на одному транспортному засобі, що обумовлює перерозподіл навантажень між ними, тобто зміну загальної схеми.

Зазначені впливи на електромеханічну систему або які-небудь інші зміни в ній будуть супроводжуватися іншими додатковими витратами. Причому ці витрати не завжди приведуть до їхнього обов'язкового збільшення в рамках групи елементів електромеханічної системи одного функціонального призначення.

Для подальшого розв'язку поставленого завдання необхідно визначити список базових варіантів технічно можливих модифікацій електромеханічної системи як основу для аналізу доцільності реалізації визначених заходів. При цьому черговість дій по зміні існуючих параметрів електромеханічної системи на визначені в ході рішення поставленої задачі на даному етапі не має значення. Однак, кожна така операція повинна супроводжуватися перерахунком показників функціонування системи, тому що ймовірна зміна характеристик споживання суміжних груп електромеханічної системи. Це, у свою чергу, вимагає перевірити її на допустимість експлуатації по визначених з точки зору перевізного процесу технічних умовах, а також визначити додаткові витрати на вказані заходи. Це зумовлено тим, що при формуванні такого переліку задіється лише частина можливих варіацій системи щодо найбільш раціональної з точки зору енергетичного потенціалу, яка містить у собі тільки певну частину її параметрів. Тут визначені часткові заходи забезпечують реалізацію системи підходів з

підвищення енергетичного потенціалу в цілому до наступних дій, що сприяють зниження втрат у електромеханічній системі.

Формування початкового переліку технічно можливих комбінацій засобів щодо зміни електромеханічної системи ґрунтується на зіставленні їх параметрів з існуючими. Спочатку має сенс виділити незалежні групи, зміна яких не пов'язана з іншими. Потім розглядаються групи залежних засобів, тому що самостійна реалізація кожного з них неможлива без інших.

Послідовність реалізації кожного заходу повинна бути встановлена тільки для тих з них, які економічно доцільні. Останнє забезпечується виконанням умови: собівартість зекономленого палива не повинна перевищувати капіталовкладень на реалізацію заходу.

Очевидно, що для одержання якомога більшого ефекту, послідовність реалізації вже економічно припустимих заходів підвищення енергетичного потенціалу може бути визначена ранжируванням їх по такому показникові як обсяг економії.

Таким чином, методика організації програми підвищення енергетичного потенціалу буде складатися з наступних етапів:

1. Формується перелік усіх можливих технічних заходів, впровадження яких є припустимим за умовами експлуатації транспортного засобу.

2. На підставі отриманого переліку визначаються економічно припустимі заходи, виходячи з умови, що економічний ефект не повинен перевищувати капіталовкладень на реалізацію засобів.

3. Уточнений перелік припустимих заходів сортується по зменшенню обсягу зекономленого умовного палива, що й визначає послідовність їх реалізації при модернізації.

Для оцінки ефективності таких проектів рекомендується перелік наведених нижче показників [4, 15].

Економічний ефект:

$$\Delta_E = \frac{\Delta C}{P_{ам} + E_H},$$

де ΔC – незмінний по роках розрахункового періоду прибуток від результатуючих заходів підвищення енергетичного потенціалу;

$P_{ам}$ – норма реновації на амортизацію;

$E_H=0,1$ – норматив ефективності капіталовкладень.

Норма реновації на амортизацію розраховується наступним чином:

$$P_{ам} = \frac{E_H}{(1 + E_H)^{T_{са}} - 1},$$

де $T_{са}$ – строк служби електротехнічного комплексу транспортного засобу, який за нормативами складає 15 років.

Тоді для строку служби в 15 років матимемо наступне:

$$\Delta_E = \frac{\Delta C}{0,1315}.$$

Таким чином, вибір економічно доцільної системи заходів з підвищення енергетичного потенціалу залежить від поставлених цілей і схем фінансування процесу енергозбереження.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Сильною стороною дослідження є використання синергетичних властивостей системи у поєднанні з забезпеченням енергоефективного режиму роботи та керування кожним з елементів декомповованої структури електромеханічної системи. У порівнянні з відомими методами це призводить до:

- досягнення найбільш раціонального питомого рівня споживання палива;
- максимізації ККД електромеханічної системи.

Weaknesses. Слабкою стороною дослідження є ускладнення технічної конструкції системи керування електроприводом, що пояснюється:

- ускладненням технічних алгоритмів;
- збільшенням кількості здавачів.

Opportunities. Перспективою подальшого дослідження є розробка більш досконалих алгоритмів керування електротехнічними комплексами.

Threats. В світі існують аналоги об'єкту дослідження, які використовуються в електромобілях. Проте вони є непридатними для використання в дизель-генераторних системах, що пояснюється специфікою даного джерела живлення, яку показано в даному дослідженні.

8. Висновки

1. Проведено аналіз практичного досвіду декомпозиції систем тягових електроприводів, що дозволило систематизувати сучасні підходи до даного питання та визначити:

- найбільш проблемні місця (відсутність логічної системи обрання груп для проведення декомпозиції та математичного опису алгоритму даного процесу);
- типові підходи (розділення електромеханічних систем за тяговими класами).

2. Виконано узагальнення методики декомпозиції структури та параметрів тягових електроприводів при заданих вимогах з боку рухомого електротехнічного комплексу. Це дозволило забезпечити досягнення найбільш раціонального питомого рівня споживання палива та максимізації ККД електромеханічної системи за рахунок обрання режиму роботи кожного елемента таким чином, щоб загальний ККД системи був на максимальному рівні.

Література

1. Klepikov, V. B. Vvedenie v mehatroniku [Text] / ed. by V. B. Klepikov. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – 274 p.

2. Haken, H. Synergetik [Text] / H. Haken. – Springer Berlin Heidelberg, 1990. – 396 p. doi:10.1007/978-3-662-10186-5
3. Florentsev, S. N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles [Text] / S. N. Florentsev // Proceedings of International Exhibition & Conference «Power Electronics, Intelligent Motion. Power Quality (PCIM-2009)». – Nuremberg, Germany, 2009. – P. 625–627.
4. Bazhinov, O. V. Sinergetichnii avtomobil'. Teoriia i praktika [Text]: Monograph / O. V. Bazhinov, O. P. Smirnov, S. A. Serikov, V. Ya. Dvadnenko. – Kharkiv: KhNADU, 2011. – 235 p.
5. Jordan, H. E. Energy-Efficient Electric Motors and their Applications [Text] / H. E. Jordan. – Springer US, 2004. – 188 p. doi:10.1007/978-1-4899-1465-1
6. Kulagin, D. O. The mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation of magnetic circuits [Text] / D. O. Kulagin // Scientific bulletin of National Mining University. – 2014. – № 6. – P. 103–110.
7. Kulagin, D. O. Mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation [Text] / D. O. Kulagin // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – № 6. – P. 49–55.
8. Boldea, I. The Induction Machine Handbook [Text] / I. Boldea, S. A. Nasar. – CRC Press, 2010. – 968 p.
9. El-Sharkawi, M. A. Fundamental of electric drivers [Text] / M. A. El-Sharkawi. – Brooks: Cole production, 2000. – 400 p.
10. Stone, G. C. Electrical insulation for rotating machines [Text] / G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. – John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 392 p. doi:10.1002/047168290x
11. Sinchuk, O. N. O tselesoobraznosti rekuperativnogo tormozheniia bol'shegruznyh kar'ernyh avtosamosvalov s elektromehani Cheskoj transmissiei [Text] / O. N. Sinchuk, A. I. Shevchenko // Vestnik Natsional'nogo tehni Cheskogo universiteta «Kharkovskii politehni Cheskii institut». – 2003. – Vol. 10. – P. 415–419.
12. Shydlovskiy, A. K. Doslidzhennia efektyvnosti rekuperatyvnoho halmuvannia elektromobilia [Text] / A. K. Shydlovskiy, V. M. Skidanov, V. B. Pavlov, O. M. Yurchenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 1998. – № 1. – P. 22–30.
13. Bulhakov, V. M. Obhruntuvannia typazhu silskohospodarskykh traktoriv v Ukraini [Text] / V. M. Bulhakov, A. S. Zaryshniak, V. M. Kiurchev, V. T. Nadykto // Visnyk ahrarnoi nauky. – 2010. – № 11. – P. 5–8.
14. Kosov, V. V. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnyh proektov [Text] / V. V. Kosov, V. N. Lifshits, A. G. Shahnazarov. – Moscow: Ekonomika, 2000. – 421 p.
15. Kulagin, D. O. Proektuvannia system keruvannia tiahovymy elektroperedachamy motorvahonnykh poizdiv [Text]: Monograph / D. O. Kulagin. – Berdiansk: FOP Tkachuk O. V., 2014. – 154 p.