

НАУКОВА РОБОТА

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ»

НАПРЯМ КОНКУРСУ «АВТОМОБІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА»

НА ТЕМУ:

**«ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ НА КВАДРОЦИКЛАХ»**

АНОТАЦІЯ

В даний час близько 2,1% вироблюваної електроенергії в світі витрачається на транспорт. Значної економії палива можна домогтися за допомогою гібридних технологій, які необов'язково повинні бути зв'язані з нафтою і можуть адаптуватися під водневе або біологічне паливо. При цьому для України гібридні технології в окремих випадках можуть бути значно цікавіші ніж чисто електричні [13]. Причина в кліматі, і іноді просто необхідно спалювати більше палива, ніж потрібно для переміщення, щоб створити комфортні для водіння умови. Крім того, гібридні транспортні засоби зберігають існуючу інфраструктуру заправок [6].

Метою даної роботи є підвищення ефективності взаємодії елементів і роботи електричного приводу автономного колісного транспорту та застосування електричного приводу на квадроциклі ЗІМ-350.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

Провести огляд та аналіз конструкцій існуючих моделей квадроциклів.

Визначити базові вимоги до тягового електроприводу, провести класифікацію і визначення граничних тягових механічних характеристик для всіх основних типів електроприводів.

Розробити системи вимірювання положення тягових електроприводів для типових датчиків положення, що застосовуються в транспорті.

Розробити методи підвищення надійності тягового електрообладнання на етапі виробництва його компонентів і засобів системи управління в процесі експлуатації.

Провести експериментальні дослідження, замінивши двигун внутрішнього згоряння на електропривід на квадроциклі ЗІМ-350.

Об'єкт дослідження — комплекс електрообладнання та тяговий електропривод автомобілів.

Предметом дослідження — процес розробки конструкції та вибір оптимального тягового електроприводу для встановлення на квадроцикл.

Методи дослідження. В роботі використовувалися сучасні і класичні методи наукових досліджень, в тому числі, засновані на теоретичній електротехніці, теорії електромеханічного перетворення енергії, теорії автоматичного управління. Застосовувалося моделювання як на базі комп'ютерних імітаційних моделей реального часу, так і за допомогою пакетів прикладних програм. Експериментальні дослідження проводилися на випробувальних стендах, а також в процесі натурних випробувань квадроцикла за затвердженими методиками.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

сформульовано метод оцінки вимог до тягових електроприводів, що дозволяє визначити необхідну потужність і діапазон регулювання номінальної швидкості з урахуванням особливостей конкретного типу тягової електричної машини;

розроблено алгоритм управління потоками потужності в тягових електроприводах, що забезпечують максимальну автономію пристрою і енергетичний баланс між джерелами потужності і споживання.

удосконалено методику підвищення надійності тягового електрообладнання на етапі виробництва його компонентів і засобів системи управління в процесі експлуатації;

отримала подальший розвиток сфера застосування тягових електроприводів;

Практичне значення одержаних результатів. Створена модель електричного квадроцикла на базі ЗІМ-350 покращує екологічні показники та дозволяє значно економити кошти на паливі.

Результати досліджень доповідались на ХІ студентській науково-технічній конференції машинобудівного факультету «Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті».

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Аналіз існуючих моделей квадроциклів та базові вимоги до тягового електроприводу	6
1.1 Види квадроциклів і їх відмінності	6
1.2 Опис та основні технічні характеристики квадроцикла ЗІМ-350...	8
2 Зіставлення тягових характеристик різних типів електродвигунів	10
2.1 Типи електричних тягових двигунів	10
2.2 Застосування синхронних електродвигунів з постійними магнітами в транспорті	11
2.3 Синхронний реактивний електродвигун	12
2.4 Уніфікована структура комплектного тягового електрообладнання	13
2.5 Основні компоненти комплектного тягового електрообладнання	15
3 Експериментальні випробування застосування електричного приводу ..	19
3.1 Експериментальна установка	19
3.2 Визначення показників паливної економічності	22
3.3 Визначення витрат електричної енергії.....	24
3.5 Характеристики повністю електричного квадроцикла ЗІМ-350....	28
Висновки	29
Перелік джерел посилення.....	31

ВСТУП

Аналіз розвитку світового автомобільного ринку показує, що сьогодні електромобілі (ЕМБ) і автомобілі з комбінованими (гібридними) енергоустановками (АКЕУ) стають серйозною альтернативою для споживачів в ухваленні рішення при покупці нових автомобілів. Експертне співтовариство єдине в думці, що електричні технології стають домінуючим фактором, що забезпечує поліпшення експлуатаційної ефективності транспортних засобів (ТЗ). При цьому ключові аспекти змін в контексті розвитку автомобілів є напрямками, що несуть серйозні зміни для традиційної автомобільної промисловості, її конструкторської та технологічної бази.

Однак існує ряд теоретичних і практичних проблем, які не дозволяють в даний час ЕМБ і АКЕУ конкурувати в більшості випадків з автомобілями, обладнаними традиційної силовою установкою.

Важливе значення, для успішного впровадження електромобілів і автомобілів з гібридними енергоустановками, набуває взаємозв'язок між наборами проектних технологій і комплексів забезпечення експлуатаційної ефективності базуються на показниках якості і надійності. Вирішення цих організаційно-економічних проблем неможливо без вирішення технічних завдань, пов'язаних з ефективним накопиченням електричної енергії, вдосконаленням енергоефективності приводу коліс, реалізації оптимальних алгоритмів керування системами ЕМБ і АКЕУ.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ КВАДРОЦИКЛІВ ТА БАЗОВІ ВИМОГИ ДО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Види квадроциклів і їх відмінності

Перші квадроцикли ATV були схожі на міні-трактора - їх використовували для господарських завдань. Пізніше на них стали кататися заради розваг. Час показав, що на великі відстані комфортніше їздити на SSV з кабіною автомобільного типу. У цій статті ми розберемося в основних видах техніки, щоб не було плутанини в термінології.

Коли говорять про квадроцикли, найчастіше мають на увазі ATV.

ATV (all terrain vehicle) - це чотириколісних позашляхова техніка з кермом і посадкою мотоциклетного типу. На квадроциклах ATV можна їздити як по бездоріжжю, так і по дорогах загального користування.

За призначенням квадроцикли ATV класифікують на утилітарні, туристичні, спортивні і дитячі.



Рисунок 1.2 – типовий квадроцикл ATV



Рисунок 1.3 – квадроцикл – всюдихід

SSV (side-by-side vehicle) - це мотовсудиходи, в яких органи управління - кермо, педалі і панель приладів - розташовані, як в автомобілі. У деяких моделей кабіна з дахом, повнорозмірним вітровим склом і дверима. На квадроцикли SSV встановлюють анатомічні крісла з ремнями безпеки. Мотовсудиходи цього класу підходять для поїздок по бездоріжжю і утилітарних завдань. Яскравий представник класу - CFMOTO Z10 EPS

UTV (utility task vehicle) - це мотовсюдиходи з автомобільної посадкою утилітарного призначення. Їх використовують власники заміських будинків для перевезення важких сипучих вантажів. UTV відрізняються містким кузовом самосвального типу. Яскравий представник класу - CFMOTO UFORCE 1000 EPS (U10 EPS).

баггі

Техніка автомобільного типу з хорошою прохідністю. У неї просторовий каркас безпеки, широка колія, низький центр ваги і потужний мотор.



Рисунок 1.4 – квадроцикл – БАГГІ



Рисунок 1.5 – типовий квадроцикл, в народі «інвалідка»

Квадроцикли - це чотириколісні мототранспортні засоби потужністю не більше 20 к. с. і спорядженої масою до 400 кг. Вони мають автомобільне кермо, педалі, кабінку і посадку - в цьому вони схожі на квадроцикли side-by-side. У них допустимі і елементи, властиві мотоциклам, наприклад, кермо і важелі.

Така техніка має три колеса і призначена для їзди по дорогах загального користування. об'єм двигуна трицикла не перевищує 50 куб. см., а швидкість - 50 км / год.



Рисунок 1.6 – трицикл

Основні відмінності між мотовсюдихід - посадка і розташування органів управління. Якщо у ATV посадка як у мотоцикла, то у UTV, SSV і БАГПІ посадка автомобільна. Квадроцикли відрізняються від квадроциклів малопотужними двигунами. Вони призначені виключно для доріг загального користування. Також на них потрібні права категорії В.

1.2 Опис та основні технічні характеристики квадроцикла ЗІМ-350

Квадроцикл ЗІМ-350 (рис. 1.7) – це перший рядянський мото-всюдохід, який, який виробляв Харківський завод, практично, до самого кінця ХХ століття. Квадроцикл початку 1980-х років минулого століття був обладнаний бензиновим мотором від мотоцикла ІЖ Юпітер-5 з примусовою системою повітряного охолодження і електронним запалюванням. Заводився ЗІМ-350 ножним кик-стартером, як і мотоцикл ІЖ, хоч на ньому і були завантажені акумулятори. Об'єму двигуна в 350 кубічних сантиметрів і потужністю в 50 кінських сил вистачало двомісному мото-всюдиходу з механічною коробкою передач розвивати максимальну швидкість по дорозі до 80 кілометрів на годину. Для впевненого пересування по бездоріжжю харківський мото-всюдохід був забезпечений трансмісією з чотирма підвищеними і чотирма зниженими передачами, передній і задній хід, а також реверсом і блокуванням диференціалу. Колеса встановлювалися різного діаметру заднє колесо мало більший розмір, переднє, відповідно, менший. Від ІЖів ЗІМ-350 також успадкував не тільки мотор, але і оптику.



Рисунок 1.7 – квадроцикл ЗІМ-350.

Мото-всюдихід ЗІМ-350 комплектувався двома багажниками, фаркопом, за допомогою якого він міг тягнути за собою автомобільний причіп. Також радянський квароцикл мав можливість установки каркаса для натягування брезентового тенту, тобто його можна було обладнати кабіною. Була передбачена можливість використовувати ЗІМ 350, як мінітрактор (рис.1.8) до нього можна було купити навісне сільськогосподарське і комунальне устаткування.

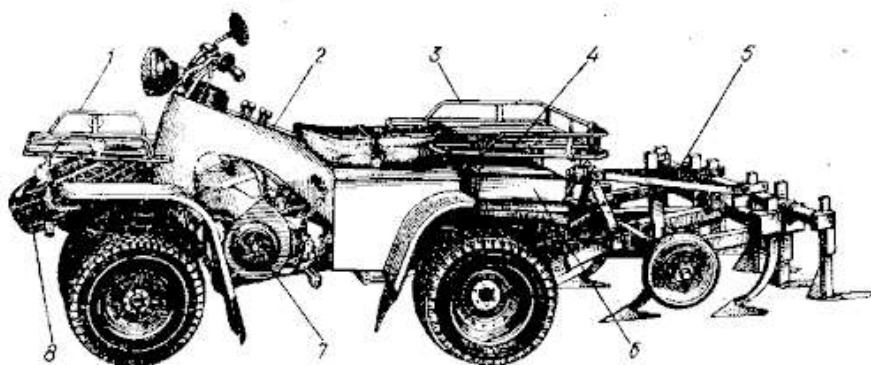


Рисунок 1.8 – квароцикл ЗІМ-350, як мінітрактор.

Опис двигуна ЗІМ-350. Тип двигуна: двотактний, двоциліндровий; Діаметр циліндра: 62 мм; Хід поршня: 57,6 мм; Ступінь стиснення: 9,3; Робочий об'єм: 347,6 см³; Максимальна потужність двигуна, кВт (к.с.) 17,6 (24); Мастильна система: спільно з паливом; Система запалювання: батарейна; Карбюратор: К-62Д, К-65Д, К-68Д або Ліков-2928СЕ (виробництва ЧССР); Застосовується паливо: бензин з октановим числом не менше 76; Очисник повітря: контактно-масляний; Охолодження: повітряне, або рідинне.

Опис двигуна Іж-Планета-2: Виробник: Іжевський машинобудівний завод; Тип: двотактний одноциліндровий; Об'єм 346 см³; Максимальна потужність 12 к.с., при 3600 об/хв; Максимальний крутний момент 25 Н·м; Кількість циліндрів: 1; Макс. Швидкість: 80 км/год; Витрата палива при змішаному циклі 7л/100км; Діаметр циліндра: 72 мм; Хід поршня: 85 мм; Ступінь стиснення: 7,5; Система живлення: карбюратор К-36І, К-65; Охолодження: повітряне; Матеріал блоку циліндрів: алюміній; Матеріал ГБЦ: алюміній; Число тактів: 2 такти; Рекомендоване паливо А-72, А-80 в суміші з маслом.

2 ЗІСТАВЛЕННЯ ТЯГОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1 Типи електричних тягових двигунів

Першим електродвигуном, який застосовувався в якості тягового, був двигун постійного струму. В даний час даний тип приводу практично не розглядається в нових розробках. Існуючі на його основі рішення проходять часткову або глибоку модернізацію.

Застосування двигунів змінного струму довгий час обмежувалося відсутністю силової електроніки, однак з її появою переваги двигуну змінного струму стали очевидними: не потребує обслуговування і висока надійність; менша маса комплектного тягового обладнання.

Якщо не потребує обслуговування в основному визначається відсутністю колекторного вузла, то менша маса досягається збільшенням швидкості обертання (15000 об / хв для двигуна автомобілів Тесла; 11400 об / хв для BMW і3) до значень, недоступних при тих же потужностях для колекторних двигунів постійного струму.

У світі в даний час найпоширенішим за встановленою потужністю на електротранспорті є асинхронний електродвигун (Induction motor), який встановлюється на залізничний транспорт, трамваї, тролейбуси, дорожні машини. Однак наймасовішим за кількістю електроприводів став синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами (СДПМ) (interior permanent magnet synchronous motor). Їх суттєве зростання в останні 10 років пов'язане з проникненням в сегмент дорожніх машин. По суті, єдиними випускаються автомобілями, котрі мають асинхронний тяговий електродвигун, є автомобілі Tesla Motors.

Багато років вчені називають перспективним для транспортних застосувань вентильно-індукторний електродвигун (ВІД) з самозбудниками (switched-reluctance motor), проте даний двигун не вийшов за межі концептів.

2.2 Застосування синхронних електродвигунів з постійними магнітами в транспорті

Існують два основні варіанти виконання СДПМ з точки зору управління та виду механічної характеристики - це двигуни, спроектовані для роботи з постійним моментом нижче номінальної швидкості, і двигуни з відносно великою індуктивністю поздовжньої осі, яко дозволяє повністю або частково нейтралізувати протидії ЕРС, вироблену постійними магнітами.

Перший варіант застосовується найбільш часто в «помірних гібридах», де такий двигун працює на одному валу паралельно основному двигуну внутрішнього згоряння, а необхідний діапазон сталої потужності забезпечується коробкою передач.

Другий варіант знайшов широке застосування в дорожніх машинах зарахунок глибокої зони ослаблення поля. Дані двигуни виконуються полюсними і мають більше значення індуктивності поперечної осі, ніж продольної, що досягається за рахунок спеціальних магнітних бар'єрів. Конструкція такого електродвигуна, представлена на рис. 2.1 [18]. Конструкція може бути виконана і неявнополюсною і з більшою поздовжньою індуктивністю.

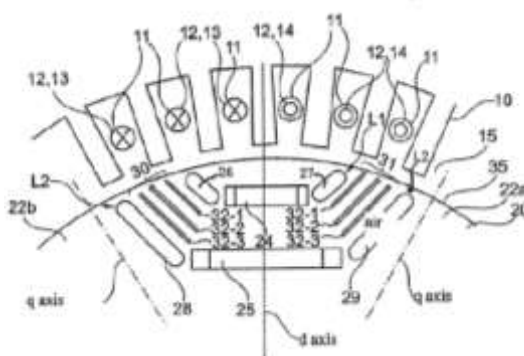


Рисунок 2.1 – конструкція синхронного електродвигуна з постійними магнітами

Хороші тягові характеристики зробили ці двигуни настільки популярними, що на сьогоднішній день тільки автомобілі Tesla і Renault випускаються з іншим типом приводу (а саме асинхронним і синхронним з регульованим збудженням).

Однак у порівнянні з асинхронним приводом, де на нульовій швидкості в режимі зупиненого транспортного засобу може бути присутнім деяке ковзання, в СДПМ протікають постійні струми, що концентрує струмове навантаження на одних і тих же елементах силового перетворювача.

Основним обмеженням до застосування даного типу двигуна в транспорті вважається неможливість погасити ЕРС будь-яким іншим способом крім механічного розчеплення вала. Для транспортних засобів де стоїть багато дороговартісних двигунів, ця проблема має принциповий характер, так як відмова тільки одного тягового приводу паралізує весь транспортний засіб.

Якщо продовжити рух з несправним двигуном (наприклад, коротке замикання в обмотках), то можливий подальший розвиток проблеми через наявності ЕРС від постійних магнітів, що виражається в загорянні і пожежі на борту транспортного засобу. Аналогічна проблема може виникати при використанні даного типу електричної машини в якості генератора власних потреб з відбором потужності від основної енергоустановки, наприклад, на літаку.

2.3 Синхронний реактивний електродвигун

Синхронні реактивні електродвигуни (СРД) тільки починають активно проникати на ринок промислових електроприводів. Довгий час вони не були популярні із-за трохи меншого коефіцієнта потужності, ніж у АД, що вимагає завищення встановленої потужності інвертора. Другий фактор - неможливість працювати (або стартувати) при живленні від мережі - стримував їх вихід на ринок. Але з масовим переходом на частотно-регульований електропривод (там, де це потрібно і немає), ці двигуни почали набирати популярність.

До переваг машини слід віднести:

- Простота і надійність конструкції, так як ротор зроблений з штампованої електротехнічної сталі.

- В роторі практично відсутні втрати. Так як ротор не перемагнічується і не має втрат ковзання (на відміну від АД), то втрати незначні, а значить, не потрібно проектувати будь-який спеціальний відвід тепла.

- Бездатчикового управління можливо в усьому діапазоні швидкостей. За рахунок сильної магнітної анізотропії можливе створення самосенсорних систем управління, що працюють на нульових швидкостях, з перемиканням на бездатчикову систему, що працює за принципом оцінки протидії ЕРС, на високих.

До недоліків:

- Неможливість працювати від мережі.
- Проблеми з міцністю ротора на високих швидкостях і при сильній оптимізації співвідношення поздовжньої і поперечної індуктивностей.
- Низький коефіцієнт потужності в порівнянні з АД.

Практичного застосування в транспорті СРД поки не отримав, проте роботи з дослідження даного типу приводу в транспортних цілях ведуться.

2.4 Уніфікована структура комплектного тягового електрообладнання

Гібридні ТЗ послідовного типу будуються навколо загальної ланки постійного струму (ЗПС). У загальному випадку, з метою збільшення надійності і довговічності ТЗ трансмісія може містити кілька незалежних ланок постійного струму, що живляться від різних генеруючих підсистем і живлять різних споживачів.

Генерування енергії здійснюється від нереверсивного джерела живлення. Це може бути дизель-генераторна установка або паливний елемент. Тягові електроприводи і допоміжне обладнання живляться від ЗПС. До ЗПС також підключаються накопичувачі енергії, такі як акумуляторні батареї і суперконденсатори. Разом всі елементи, що входять до електротрансмісії, називаються комплектом тяговим електрообладнанням (КТЕО) [18].

Інформаційний обмін між елементами КТЕО трансмісії, необхідно для управління і їх узгодженої взаємодії, здійснюється різними способами. Як

правило, є більше як одна локально інформаційна промислова мережа для підвищення надійності і канал аварійного управління.

Приклад структури комплектного тягового електрообладнання представлено на рис. 2.2. система містить ДВЗ як первинне джерело живлення, 9-фазний тяговий генератор (ТГ) з трьома тріадами обмоток, силовий перетворювач тягового генератора (СПТГ), що забезпечує випрямлення напруги генератора для живлення ЗПС. Дві тріади генератора підключені до ЗПТ через інвертори СПТГ і можуть бути використані для режиму «гальмування дизелем» і для стартерного режиму ДВЗ. До ЗПС через перетворювач акумулятора і молекулярного (суперконденсаторна) накопичувача (ПАН) підключені акумуляторна батарея 24В для живлення всіх керуючих ланцюгів і молекулярний (суперконденсатор) накопичувач (МН), який може забезпечити рух транспортних засобів з вимкненим дизель-генератором на відстань до 700 м. Далі до ЗПС підключені 8 інверторів, що живлять 4 двигуна (по одному на кожне колесо квадроцикла).

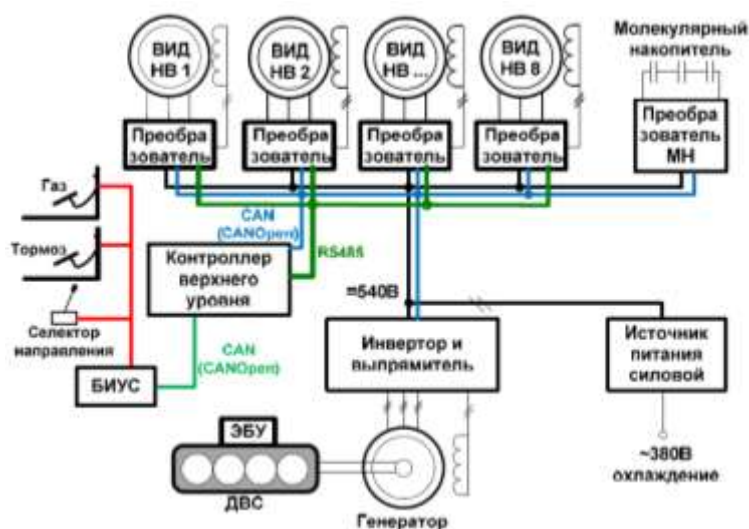


Рисунок 2.2 – приклад структури електротрансмісії

У такому вигляді трансмісія, доповнена допоміжним обладнанням, була реалізована в декількох проектах: при створенні трансмісії вантажних автомобілів та мотовсьдиходів, може також застосовуватись в трансмісіях багатовісних колісних автомобілів великої вантажопідйомності.

2.5 Основні компоненти комплектного тягового електрообладнання

Дизель-генераторна установка є основним джерелом живлення тягових електроприводів. Вона складається з трьох основних компонентів:

- Двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) (це може бути дизельний або бензиновий двигун);
- Тягового генератора (ТГ);
- Силового перетворювача тягового генератора (СПТГ).

ДВЗ є пристроєм для отримання механічної потужності шляхом спалювання палива. Даний процес не є оборотним.

Управління ДВЗ здійснюється від контролера ДВЗ, який може регулювати подачу палива і, відповідно, потужність або швидкість обертання вихідного валу. Контролер управління ДВЗ контролюється по мережі CAN по протоколу зв'язку J1939.

Генератор, що знаходиться на валу, служить для перетворення механічної потужності в електричну. Генератор може виконувати з регульовальні порушення (наприклад, вентильно-індукторний генератор з незалежними порушенням) і нерегульованим (синхронний генератор з збудником від постійних магнітів). Застосування генератора з регульованим збудником має перевагу з точки зору вибору оптимальної точки (швидкості) роботи ДВЗ при стабільній напрузі ланки постійного струму ТЗ. Для генератора з нерегульованим збудженням напруга ланки постійного струму буде стабілізуватися за рахунок зміни частоти обертання ДВЗ, що дає більшу витрату палива, наприклад, при русі на високій швидкості з малим навантаженням, коли потрібна велика напруга ЗПС через велику протидію ЕРС тягових приводів.

Для перетворення змінної напруги генератора в постійне застосовується силовий перетворювач тягового генератора, який в самому найпростішому випадку являє собою некерований випрямляч. СПТГ може виконуватися і у вигляді інвертора. У цьому випадку він може виконуватися в якості стартера і забезпечувати підкручування генератора в процесі гальмування, забезпечуючи

режим гальмування за рахунок механічного та пневматичного опору в ДВЗ - гальмування двигуном. Приклад функціональної схеми дизель-генераторної установки представлений на рис. 2.3.

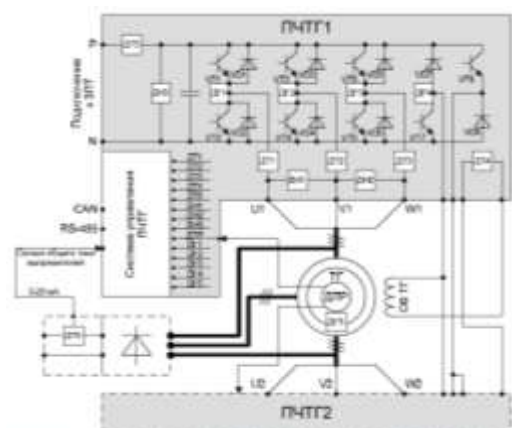


Рисунок 2.3 – приклад функціональної схеми дизель-генераторної установки

Кожен інвертор тягового генератора має свій власний цифровий релейний регулятор струму збудження. При цьому в штатному режимі навантаження бере на себе один з перетворювачів. В аварійних режимах, при відмовах одного із збудників, навантаження автоматично сприймається іншим збудником. Таким чином, забезпечується автоматичне резервування відповідального контуру управління збудженням тягового генератора.

Функціональна схема силового перетворювача суперконденсаторного (молекулярного) накопичувача представлена на рис. 2.4. Перетворювач виконаний у вигляді універсального двонаправленого DCDC-перетворювача без гальванічної розв'язки. У такому варіанті схема здатна працювати з будь-якими рівнями напруги як на стороні ЗПС, так і на стороні МН.

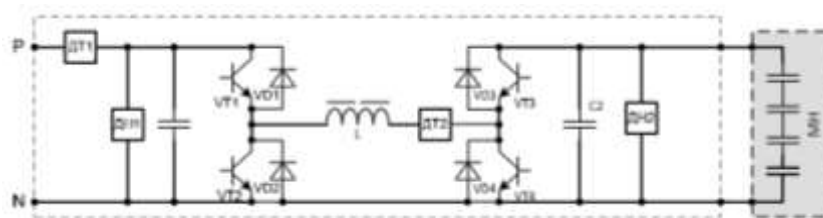


Рисунок 2.4 – функціональна схема силового перетворювача суперконденсаторного накопичувача

Зазвичай, МН підключається до ЗПС через підвищувальний перетворювач, має тільки одну стійку. При меншій кількості транзисторів ККД буде вище, але для вантажівок варіант з універсальним перетворювачем вибирався, щоб дослідити всі можливі режими роботи з будь-якими співвідношеннями напружень, і мати можливість електронно відключати МН від ЗПС. У схемі з підвищуваним перетворювачем зв'язок залишається через діод, а при наявності джерел живлення, підключених до ЗПС, відбудеться повний розряд МН, що було неприпустимо для даного типу накопичувача і могло вивести його з ладу. МН використовується для прийому енергії рекуперативного гальмування ТЗ, для накопичення надлишків енергії генерується дизель-генераторна установка, для покриття дефіциту енергії при розгоні ТЗ, для реалізації режиму тихого ходу з відключеним дизель-генератором, а також для забезпечення енергією СПТГ при стартерному режимі роботи.

У процесі гальмування ТЗ тягові електродвигуни виробляють електроенергію, яка надходить на ЗПС. Ця енергія може бути збережена в МН для подальшого використання, однак обсяг (електрична ємність) МН обмежена, і вона може бути заповнений, наприклад, на затяжному спуску ТЗ з гори. Друга можливість полягає в віддачі частини енергії на вал генератора. Дизельний двигун при цьому перестає забезпечуватися паливом, а заслонки закриваються, щоб створювати більший опір поршневій групі. Однак в такому режимі складно розсіяти більше 20% номінальної потужності дизельного двигуна. Ще невелику частину енергії візьмуть на себе джерела вторинного живлення, насоси охолодження, вентиляція, гідравлічні приводи і ряд інших споживачів.

Для прийому залишкової енергії генераторного гальмування тягових електродвигунів необхідно кероване підключення резисторів до ланки постійного струму, яке виконується силовим перетворювачем гальмівних резисторів (СПГР), зображеним на рис. 2.5.

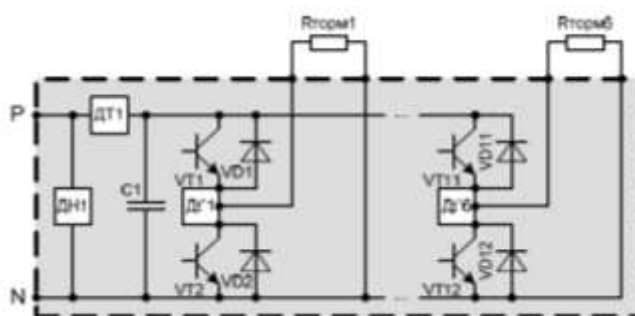


Рисунок 2.5 – функціональна схема силового перетворювача гальмівних резисторів

Даний перетворювач, як і силовий перетворювач суперконденсаторного накопичувача, є опціональним. За умови безпеки мимо електричного гальмування обов'язково необхідна наявність механічних гальм на випадок відмови електричної системи.

Силовий перетворювач тягових електродвигунів (СПТЕД) містить 6-ключовий містовий інвертор, підключений до ЗПС електротрансмісії, а також напівмостовий збудник. Напівмостова схема збудника забезпечує максимальне форсування і розфорсування при регулюванні струму порушення тягового двигуна для забезпечення максимальної швидкодії в контурі регулювання потоку двигунів з регульовальним збудженням (таких як вентиляно-індукторного електродвигуна з незалежним збудженням), як при посиленні, так і при ослабленні поля. На рис. 2.6 приведена функціональна схема силового перетворювача тягового електродвигуна.

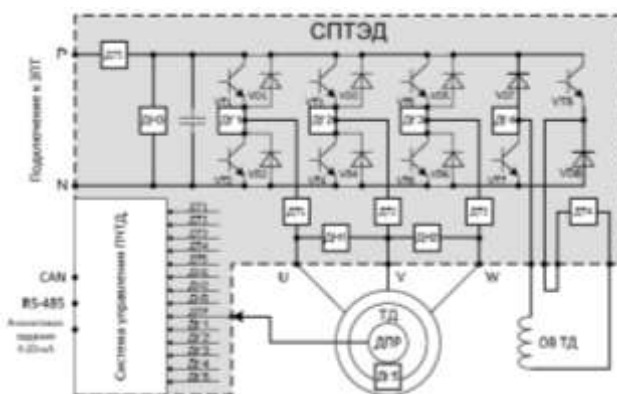


Рисунок 2.6 – функціональна схема силового перетворювача тягового електродвигуна

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ

3.1 Експериментальна установка

Для підвищення наочності результатів випробування проводилися на електроприводі малої потужності, що включає в себе інвертор з живленням напругою 28 В типу DRV8302-НС-C2-KIT від компанії Texas Instruments.

Контролер системи управління реалізований на базі мікроконтролера TMS320F28035, що працює на частоті 60 МГц. цей мікроконтролер має один модуль захоплення, тому алгоритми вимірювання швидкості були адаптовані для роботи з єдиним сигналом каналу "А" з ІДПР. Інвертор живить СДПМ з двома парами полюсів, номінальний діючий струм 6 А, а максимальна швидкість 5000 об/хв. На валу електродвигуна установлений оптичний ІДПР HEDM-5500 # B06 від 1000 міток на оберт. Зовнішній вид експериментальної установки показаний на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – елементи експериментальної установки

Система управління реалізована на мові Си в середовищі Code Composer Studio IDE і являє собою систему векторного керування (СВК) з контуром струму,

що працює на частоті 10 кГц. Система містить два регулятора струму по поздовжній і поперечній осях III типу, регулятор швидкості пропорційного типу з коефіцієнтом підсилення A 0,08 об/хв. Вихід регулятора швидкості обмежений на рівні ± 10 А. Частота виклику регулятора швидкості 2 кГц. Це істотно менше частоти контуру струму, однак при такому поєднанні можна більш явно показати різницю між вихідним методом з постійним часом вимірювання і синхронізованим.

Експериментальні дані отримані за допомогою цифрового осцилографа, реалізованого всередині системи управління на базі модуля DLOG з пакету бібліотек Control Suite від компанії Texas Instruments.

Реалізація синхронізованого методу СЕТ на мові асемблера потребує близько 5 мкс процесорного часу на мікроконтролері з частотою 60 МГц і 13 мкс при реалізації на мові Си.

Перехідний процес пуску двигуна зі стандартним методом постійного часу вимірювання представлений на рис. 3.2. Задання швидкості змінювалась стрибком від нуля до 2000 об/хв. В результаті регулятор швидкості попадає в насичення і формує завдання струму по поперечній осі дорівнює 10 А, в результаті чого електродвигун розганяється з приблизно постійним прискоренням. У момент часу приблизно рівний 4 мс відбувається перше вимірювання швидкості. Регулятор швидкості виконується кожні 500 мкс і кожен виклик завдання струму поперечної осі оновлюється. З ростом швидкості час виміру залишається приблизно постійним і тримається в районі 30 000 тактів ЦПУ або 5 мкс. Щоб утримувати час вимірювання близько цього значення, алгоритм СЕТ постійно змінює заданий приріст кута, однак вимірювальна система працює асинхронно з регулятором швидкості, тому вимірювання може відбуватися в будь-який момент часу. Таким чином, регулятор швидкості використовує сигнал зворотного зв'язку, що має змінну затримку, яка максимально може дорівнювати 5 мкс.

Коли привід досягає заданої швидкості, і регулятор швидкості виходить з насичення і починає працювати, в перехідному процесі, як по струму, так і

швидкості, видно значні коливання. Вони обумовлені занадто великим коефіцієнтом посилення регулятора швидкості для цієї затримки в ланцюгу зворотного зв'язку і для даного моменту інерції.

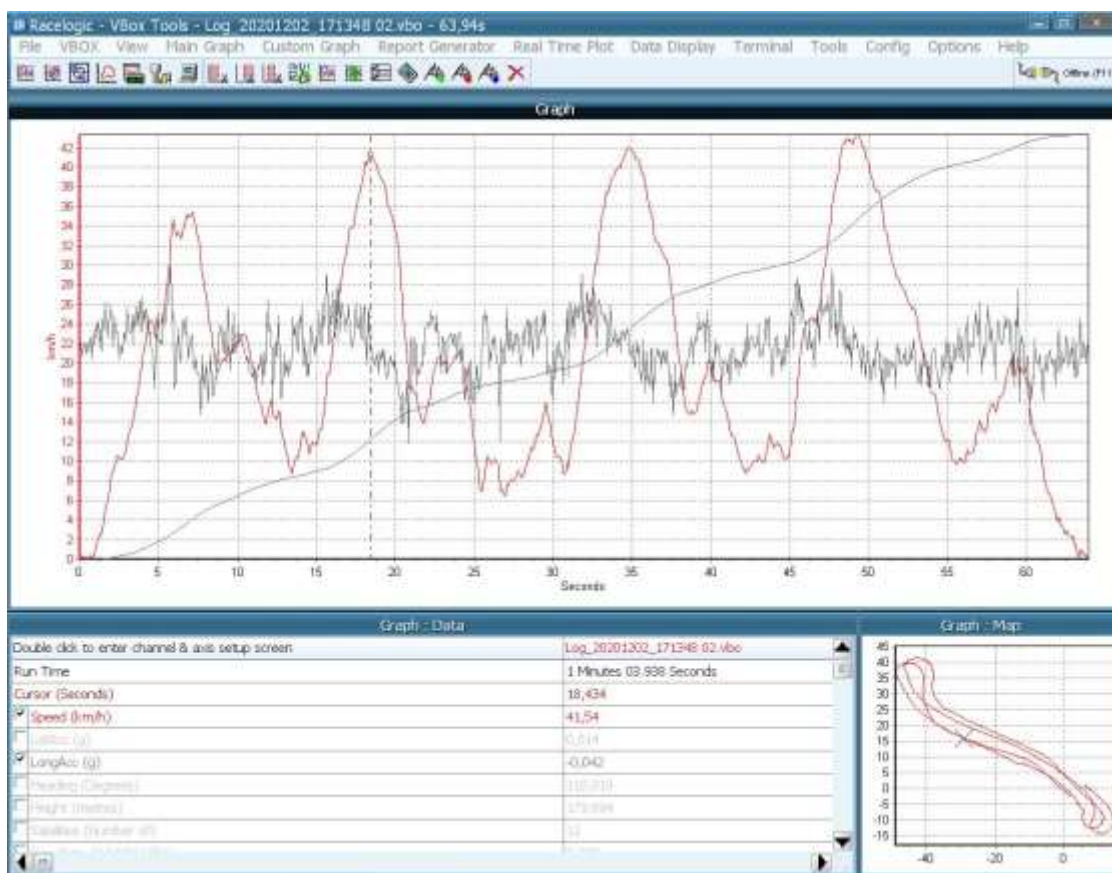


Рисунок 3.2 – вимірювання швидкості, прискорення та часу руху електричного приводу

Щоб зменшити затримку в колі зворотного зв'язку за швидкістю, час вимірювання було зменшено в два рази, що природно знизило точність вимірів швидкості на один двійковий розряд. Процес розгону двигуна з переналаштованим вимірником представлений на рис. 3.3.

Час вимірювання зменшився в два рази, як і приріст кута. Це добре видно, що частота вимірювання швидкості виросла і «сходинок» на зростаючій швидкості зменшилися приблизно в два рази. Особливо слід відзначити, що вихід на задану швидкість більше не супроводжується значними коливаннями в струмі і швидкості, що обумовлено зменшенням затримки в каналі зворотного зв'язку.

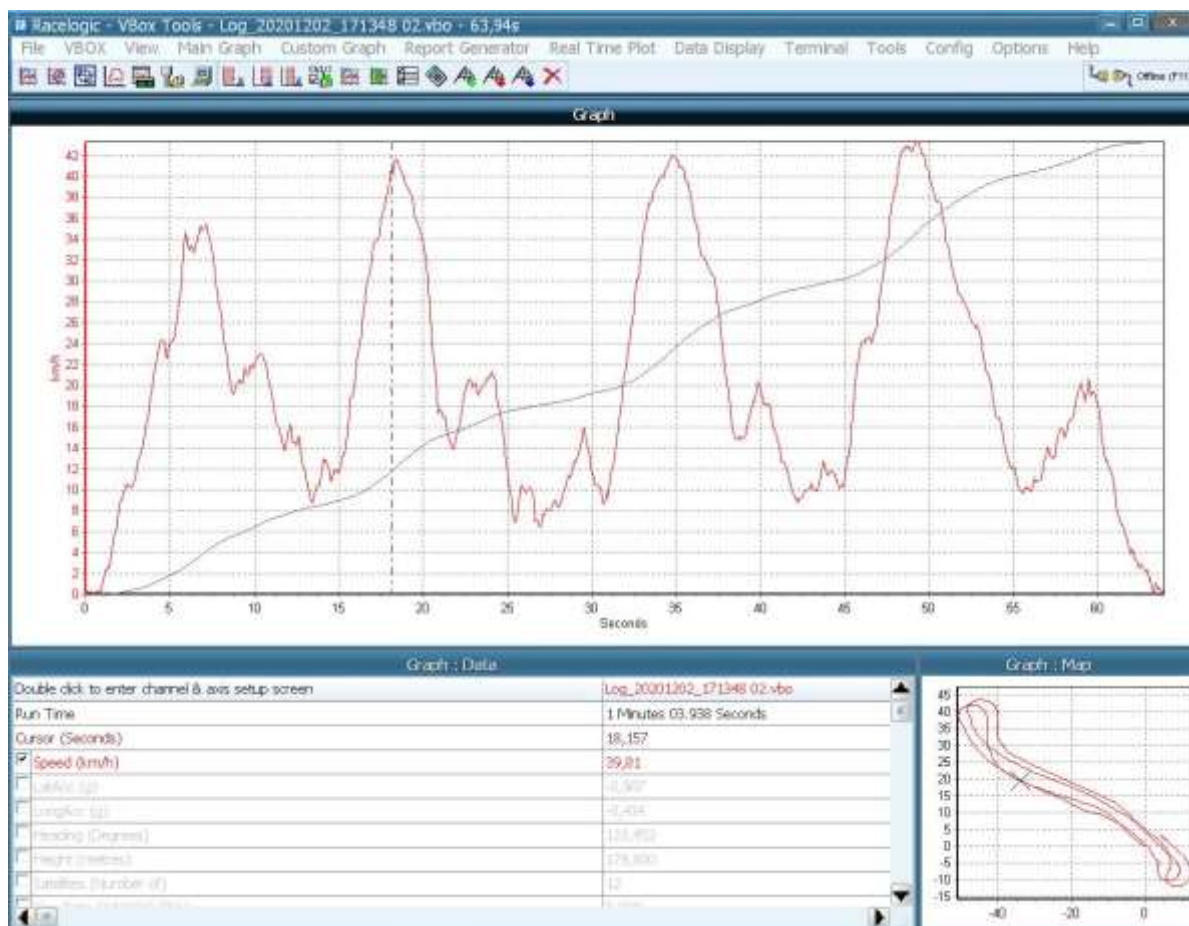


Рисунок 3.3 – зміна швидкостей руху при тому ж часі

Аналогічний досвід був проведений з синхронізованим методом, результат представлений на рис. 3.4. Перехідний процес практично повторює попередній досвід по коливаннях при виході на задану швидкість, однак тут в два рази (на один біт) вище, ніж в попередньому досвіді. За рахунок виключення затримки між виміром і застосуванням зворотного зв'язку можна або підняти точність в порівнянні з класичним СЕТ методом в два рази, або при тій же точності отримати в два рази більше високу динаміку контуру швидкості.

3.2 Визначення показників паливної економічності

Оскільки умови, в яких працюють автомобілі, досить різноманітні, то і розрахунок інтегральних показників — також процес складний і трудомісткий. Для полегшення цієї роботи розроблені нормативні документи

та методики, в яких встановлюються параметри, що оцінюють окремі випадки паливної економічності з урахуванням дорожніх умов, режимів навантаження та швидкісних характеристик.

Одна з таких методик вкладена в навчальному посібнику «Автомобілі : тягово-швидкісні властивості та паливна економічність» укладачами якого є : Сахно В.П., Безбородова Г.Б., Маяк М.М., Шарай С.М. [10].

Зважаючи на запропоновану методику можна виділити, що визначення витрати палива автомобіля при розгоні має вигляд :

$$Q_s = \frac{g_e}{10^4 \cdot 3,6 \cdot \eta_m \rho_T} \cdot \left(M_a \psi g + \frac{K_B F V^2}{3,6^2} + \delta_{BP} M_a \frac{dV}{dT} \right) \quad (3.1)$$

де g_e – питома витрата палива, г/кВт·год; M_a – повна маса автомобіля, кг; η_m – коефіцієнт корисної дії трансмісії; ρ_T – щільність палива, кг/м³; ψ – сумарний коефіцієнт опору дороги; δ_{BP} – коефіцієнт обертових мас; K_B – коефіцієнт обтічності; g – прискорення вільного падіння, м/с²; F – площа лобового супротиву, м²; V^2 – швидкість автомобіля, км/год.

При усталеній швидкості руху автомобіля на горизонтальній дорозі будуть відсутні сили опору P_h , тому рівняння (2.1) спрощується до вигляду:

$$Q_s = \frac{g_e}{10^4 \cdot 3,6 \cdot \eta_m \rho_T} \cdot \left(M_a g f + \frac{1}{3,6^2} + K_B F V^2 \right). \quad (3.2)$$

Для визначення ефективної питомої витрати палива, скористаємося методикою розробленою в Московському автомобільно-дорожньому університеті (МАДІ), яка має вигляд простого емпіричного виразу:

$$g_e = g_{eN} K_{об} K_{и}, \quad (3.3)$$

де g_{eN} – питома витрата палива при максимальній потужності двигуна N_{max} , г/кВт·год;

$K_{об}$ – емпіричний коефіцієнт, що визначає вплив на значення g_e відносної кутової швидкості X_i обертання колінчастого валу;

$K_{\text{И}}$ – емпіричний коефіцієнт впливу на значення g_e ступеню використання И потужності двигуна.

Середнє значення питомої витрати палива g_{eN} , що відповідає максимальній потужності N_{max} двигуна, для дизелів становить – 120...240 г/кВт·год.

Коефіцієнт $K_{\text{об}}$ визначається за рівнянням :

$$K_{\text{об}} = 1,25 - 0,99X_i + 0,98X_i^2 - 0,24X_i^3, \quad (3.4)$$

А коефіцієнт $K_{\text{И}}$ – за рівнянням:

$$K_{\text{И}} = 1,2 + 0,14И - 1,8И^2 + 1,46И^3, \quad (3.5)$$

де X_i – відносна кутова швидкість колінчастого валу;

И – ступінь використання потужності двигуна.

Для паливної економічності автомобіля найбільш вдалим коефіцієнт використання потужності буде в межах $И = (0,4 - 0,9) N_{\text{max}}$.

3.3 Визначення витрат електричної енергії

За методикою описаною в матеріалах [10] визначимо сили, що діють на автомобіль, на подолання яких буде затрачено електричну енергію.

Додавши значення усіх сил які діють на автомобіль отримаємо сумарну силу P_{Σ} , Н:

$$P_{\Sigma} = P_k + P_j + P_{\alpha} + P_w + P_f, \quad (3.6)$$

Для визначення виконаної роботи потрібно порахувати сумарну потужність, Вт

$$N_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot V, \quad (3.7)$$

де V – швидкість автомобіля, м/с.

В загальному випадку витрата електроенергії автомобілем з електричним приводом є відношенням виконаної роботи A , Дж та загального коефіцієнту корисної дії η_{Σ} :

$$E = \frac{A}{\eta_{\Sigma}} \quad (3.8)$$

Загальний коефіцієнт корисної дії є добутком коефіцієнтів корисної дії усіх діючих елементів енергетичної установки:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{акб}} \cdot \eta_{\text{конт}} \cdot \eta_{\text{ел.дв}} \cdot \eta_{\text{тр}}, \quad (3.9)$$

де $\eta_{\text{акб}} = 0,82$ – коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї;

$\eta_{\text{конт}} = 0,9$ – коефіцієнт корисної дії контролера;

$\eta_{\text{ел.дв}} = 0,88$ – коефіцієнт корисної дії електричного двигуна;

$\eta_{\text{тр}} = 0,95$ – коефіцієнт корисної дії трансмісії автомобіля.

$$\eta_{\Sigma} = 0,82 \cdot 0,9 \cdot 0,88 \cdot 0,95 = 0,62 \quad (3.10)$$

Щоб знайти загальну витрату електроенергії E_{Σ} нам потрібно визначити миттєву витрату електроенергії, на кожну секунду циклу E_M , за формулою:

$$E_M = \frac{A_M}{\eta_{\Sigma}}, \quad (3.11)$$

де A_M – виконана робота на кожну секунду циклу, Дж, яка визначається за формулою:

$$A_M = N_M \cdot t, \quad (3.12)$$

де N_M – миттєва потужність на кожну секунду циклу, кВт,

$$N_M = N_{\Sigma}(t) \quad (3.13)$$

В такому випадку формула визначення сумарної витрати електроенергії на циклі E_{Σ} , кВт·год, матиме вигляд:

$$E_{\Sigma} = \frac{A_{\Sigma}}{\eta_{\Sigma}}, \quad (3.14)$$

де A_{Σ} – сумарна виконана робота, Дж.

Або у вигляді суми усіх миттєвих витрат електроенергії на циклі:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^t E_{Mi}, \quad (3.15)$$

де t – тривалість циклу, с; E_M – миттєва витрата електроенергії, кВт.

3.4 Розрахунок максимальної потужності електроприводу

Максимальна тяга найбільш часто визначається ухилом дороги, який потрібно долати або в короткочасному режимі, або постійно. Наприклад, для руху по кар'єрах або бездоріжжю, де як правило їздять квадроцикли, тривалий ухил заданий рівним 12% (6,84°), а короткочасний - 24% (13,5°). Для дорожніх автомобілів максимальний ухил зустрічається на багаторівневих паркінгах і гірських дорогах. Для паркінгів він становить до 18% (10,2 °) [9], проте в Німеччині його доводять до 30% або 17°. Відповідно формула повинна враховувати одночасно і силу тертя кочення, і проекцію сили тяжіння:

$$F_{max} = mg \left(\sin(\alpha) + \frac{f}{R} \right), \quad (3.22)$$

де α - кут ухилу дороги.

Розглянемо приклад електроприводу встановленого на ЗІМ-350, який сильно відрізняються за вимогами до трансмісії ТЗ.

ЗІМ-350 має масу 1 245 кг. З урахуванням 2-х пасажирів по 80 кг маса збільшується до 1565 кг. Коефіцієнт аеродинамічного опору на площу поперечного перерізу 0,69 м² [8]. Потужність вбудованого тягового електродвигуна дорівнює 125 кВт. Задамося максимальним ухилом 30%, щільністю повітря 1,2 кг/м³. Максимальна швидкість обмежена електронікою на рівні 50 км /год. Дане обмеження диктується втратами в металі і механічною міцністю конструкції електричної машини [5]. Виберемо коефіцієнт тертя кочення 0,01 [10], радіус колеса становить 0,34 м. Сила опору при максимальній швидкості становить:

$$F_{vmax} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,69 \cdot 41,67^2 + \frac{0,01}{0,34} \cdot 1565 \cdot 9,81 = 1736 + 452 = 2188 \text{ Н.} \quad (3.23)$$

Максимальна потужність дорівнює:

$$P_{Vmax} = F_{Vmax} \cdot V_{max} = 2188 \cdot 41,67 = 91,2 \text{ кВт.} \quad (3.24)$$

Для подолання ухилу в 30% потрібна максимальна тяга, яка визначається за формулою:

$$F_{max} = 1565 \cdot 9.81 \cdot \left(\sin(17^\circ) + \frac{0,01}{0,34} \right) = 4863 \text{ Н.} \quad (3.25)$$

Характеристика тягового електроприводу ЗІМ-350 представлена на рис. 3.6. Дану характеристику можна перебудувати в координатах сили і поступальну швидкість ТЗ і розмітити на ній розраховані обмеження.

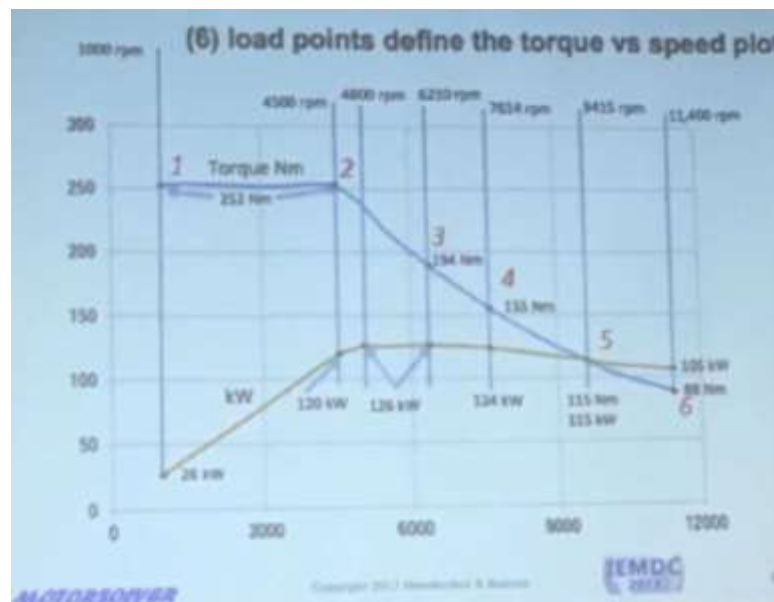


Рисунок 3.6 – характеристика тягового електроприводу

Дану характеристику можна накласти на наведені розрахунки. За влучним висловом є невеликий запас, однак видно, що визначальним є опір на максимальній швидкості. Так при зміні характеристик дорожнього покриття до асфальтового в задовільному стані ТЗ буде здатний розігнатися рівно до максимальної швидкості без запасу по моменту.

Якщо визначити діапазон сталості потужності D для даного тягового електроприводу як відношення максимальної швидкості до номінальної за вирахуванням одиниці, то цей показник тягового електроприводу ЗІМ-350 рівний 1,5. Він міг бути і менше, так як тяга, необхідна для подолання максимального

ухилу досягається на швидкості 45 км /год. В цьому випадку можна було б приблизно в 1,5 рази зменшити масу постійних магнітів в роторі, підвищивши номінальну швидкість, однак дана зміна конструкції електродвигуна і його тягової характеристики привело б до суттєвого (в ті ж 1,5 рази) зниження динаміки квадроцикла в зоні низьких швидкостей, що небажано, так як буде відчуватися водієм і відіб'ється на часі розгону до 40 км/год, який приводять виробники квадроциклів як основний показник динамічності ТЗ.

3.5 Характеристики повністю електричного квадроцикла ЗІМ-350

Основні параметри тягового електроприводу

Параметр	Значення	Одиниці
Номінальна потужність	60	кВт
Номінальна лінійна напруга	400	В
Номінальний струм	500	А
Номінальна частота обертів	100	об/хв
Номінальний струм збудження	22	А
Максимальна частота обертів	4000	об/хв
Число пар полюсів	2	
ККД в номінальній точці	92	%

На рисунку 3.7 показана експериментальна характеристика тягового електроприводу потужністю 60 кВт для повністю електричного квадроцикла ЗІМ-350. Напруга ЗПС становило близько 700 В, і живлення інвертора відбувається від LiFePO батареї.

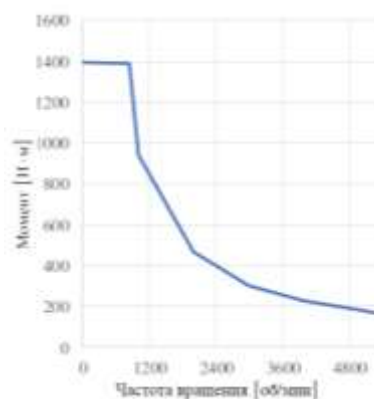


Рисунок 3.7 – механічна характеристика тягового електроприводу з СВУ

В результаті виконаних досліджень розроблено комплекс алгоритмів ідентифікації швидкості і положення для основних типів датчиків, що застосовуються в тягових електроприводах.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуті питання побудови сучасних ефективних систем управління комплектних гібридних електричних трансмісій, проведений аналіз вимог до тягових приводів і виконаний аналіз основних типів тягових електроприводів з точки зору відповідності даним вимогам, розглянуто питання енергетичного балансу в трансмісіях, реалізовані заходи з підвищення надійності в області сучасних цифрових систем управління тягового електроприводу.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Розроблено методику оцінки вимог до тягових електроприводів з урахуванням обмежень силового перетворювача, що дозволяє визначити необхідну потужність і діапазон регулювання вгору від номінальної швидкості тягових електричних машин наступних типів: асинхронний електродвигун, синхронний електродвигун з постійними магнітами, реактивний синхронний електродвигун, вентильно-індукторний електродвигун і вентильно-індукторний електродвигун незалежного збудження.

2. Розроблено та реалізовано спосіб управління потоками потужності в гібридних електротрансмісіях, що працює в функції навантаження ланки постійного струму трансмісії і забезпечує максимальну автономність пристроїв і стійкий енергетичний баланс між джерелами потужності і споживачами.

3. Для всіх основних видів датчиків положення ротора, що застосовуються в тяговому електроприводі, запропоновані алгоритми вимірювання швидкості і положення, а для інкрементального датчика положення розроблено алгоритм синхронізованого вимірювання швидкості обертання тягових електроприводів, що забезпечує мінімальну затримку вимірювання при збереженні точності, що

особливо важливо в зв'язку з постійним зростанням максимальних швидкостей тягових електротроприводів.

4. Розроблено методики проектування стендового обладнання для атестації мікроконтролерних систем управління і методика діагностування стану електрообладнання засобами системи управління.

5. Розроблені рішення застосовані при створенні гібридних трансмісій і їх елементів, електропривід встановлено на квадроцикл ЗІМ-350.

Отриманий досвід і напрацювання дозволяють проектувати системи управління комплектного тягового електрообладнання в найкоротші терміни з тяговими електродвигунами будь-якого типу, забезпечуючи надійну роботу трансмісії і діагностику несправностей її елементів, а також реалізовувати рішення з використанням тільки вітчизняних компонент в частині систем управління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sul, S.-K. Control of Electric Machine Drive Systems. — IEEE Press/Wiley, 2011. — 399 p.
2. URL: <http://www.computerra.ru/83395/stealthy-dopant-level-hardwaretrojans-for-intel-ivy-bridge-cpus/>
3. URL: https://can-newsletter.org/engineering/applications/180314_can-isincreasingly-used-in-army-navy-and-air-force_sipri/
4. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_escape
5. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country
6. URL: <https://newpowerprogress.com/cats-first-electric-drive-wheel-loader/>
7. Анучин А.С. Моделирование силовых преобразователей в исследовательских задачах и учебном процессе / А.С. Анучин // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. — Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. Т.2 - С. 544-547.
8. Виноградов, А.Б. Особенности реализации тягового электрооборудования гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л.с / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, В.Л. Чистосердов // Электротехника, 2017, № 5. — С. 14 — 18. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29079028>
9. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 704 с.
10. В.П. Сахно, Г.Б. Безбородова, М.М. Маяк, С.М. Шарай. Автомобілі: Тягово-швидкісні властивості та паливна економічність / Навч. Посібник/. — К: В-во «КВІЦ», 2004. - 174 с.
11. Сітовський О.П. Дембіцький В.М., Мазилук П.В., Медведєв І.І. Оцінка паливної економічності міських автобусів у їздовому циклі приведеному до реальних умов руху // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журна. — Луцьк: Луцький НТУ, 2017.— №1(10).— с.112-116
12. Сахно В.П., Корпач О.А. Оцінка тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності та токсичності автомобілі при використанні двигунів

різної потужності./ В.П. Сахно, О.А. Копач // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ. – 2012. – Вип. 26 – С. 193–196

13. Сахно В.П. Математична модель для визначення показників паливної економічності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу./ Сахно В.П., Копач О.А. // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. –Випуск 25 – С. 195–201.

14. Аналіз особливостей сучасних їздових циклів, що застосовуються для нормування токсичності відпрацьованих газів і оцінки паливної економічності автомобілів / М.Є. Якунін, О.Ю. Ребров, В.А. Насальський, Н.Б. Трофимова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 14 (1236). – С. 98–103. – ISSN 2079-0023.

15. Уточнена математична модель для визначення показників паливної економічності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу / В. П. Сахно, О. А. Копач // Вісник СевНТУ. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. - 2013. - Вип. 142. - С. 48-51.