

ШИФР «ЕЛЕКТРОКОНВЕРСІЯ»

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	4
1. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	5
2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ БУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	9
3 ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	18
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	26

АНОТАЦІЯ

Об'єкт дослідження – електричний привід міського транспорту.

Мета роботи – підтримка параметрів, що задаються, електродвигуна.

Предмет дослідження – керування електродвигуном.

Наведено визначення видів електроприводів та їх гібридів з механічними. Розглянуто переваги керованих електроприводів над не керованими. Розглянуто методи підвищення пробігу електромобілів.

Приведено огляд проблем по автомобілізації міста, приведений графік пасажиропотоку в часи пік та представлені варіанти потоку за одиницю часу на різних видах транспорту.

Означено особливості управління електродвигуном, та проведені натурні випробування на квадроциклі.

У якості проектного рішення для подальшого дослідження, запропоновано векторне бездатчикове керування електродвигуном, а також велику перспективу мало б дослідження в напрямі підвищення крутного моменту на мотор-колесі. Так як мотор-колесо не має масивною системою передачі крутного моменту від електродвигуна до ведучого колеса.

ПРИВІД, ТРАМВАЙ, ТРОЛЕЙБУС, ФУНІКУЛЕР, МОНОРЕЛЬС, АВТОМОБІЛІЗАЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СЛОВ'ЯНКА, МІСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, ПАСАЖИРОПОТІК, КВАДРОЦИКЛ.

1. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Одною з основних вимог до транспорту на електричній тязі є найбільш ефективне використання енергії що запасена в тяговій акумуляторній батареї. Від цього на пряму залежить відстань що пройде транспортний засіб на одній зарядці. Нарощувати ємність батарей не доцільно тому ЩО це приводить до суттєвого подорожання електротранспорту[19, 20].

Основну задачу по перетворенню електричної енергії постійного струму АКБ в три фазну систему живлення електродвигуна покладено на частотний перетворювач.

Використання частотного перетворювача спрямоване на розв'язок важливих завдань. Вони полягають у здійсненні керування моментом і швидкістю електродвигуна. Дані вимоги вказують на необхідність обмежувати струм двигуна, а також момент припустимими значеннями. Це виконується в процесах пуску, гальмування, а також при змінах навантаження електромобілю.

Робити це потрібно для того, щоб обмежувати динамічні ударні навантаження в механізмі перетворювача частоти. При цьому відзначаються перевантаження при роботі й необхідність в регулюванні моменту двигуна, яка виконується безупинно. Також виконання таких дій потрібно, коли необхідно точно підтримати зусилля на механізмі, який є робочим.

Існують різні методи частотного керування, які дозволяють розв'язати різні завдання при регулюванні швидкості й змінюванні моменту електродвигуна електромобіля, серед яких два основних методи – векторний і скалярний. Кожний з них має свої характерні риси, на яких слід зупинитися більш докладно.

Особливість скалярного керування полягає в його поширеності. Крім цього, частотні перетворювачі зі скалярним методом керування використовуються там, де важливо підтримувати певний технологічний

параметр. Зміна амплітуди, а також частоти живлячої напруги виступає в якості основного принципу, на якому ґрунтується даний метод. При цьому використовується закон U/f . Найбільший діапазон для регулювання швидкості становить 1:10.

Додаткові особливості скалярного методу полягають у властивій йому легкості при реалізації. Існує також і недолік, який полягає в тому, що немає можливості точно регулювати швидкість обертання валу електроприводу. Ще одна особливість – на валу двигуна частотний перетворювач зі скалярним керуванням не дає можливості контролювати момент.

Другий метод, що використовується за допомогою частотних перетворювачів в керуванні електротяговим пристроєм електромобіля – це векторний. Це такий метод керування синхронними й асинхронними двигунами, при якому формуються не тільки гармонійні струми (напруги) фаз, але й забезпечується керування магнітним потоком ротора, а саме, моментом на валу електродвигуна. Векторне керування застосовується у випадку, коли в процесі експлуатації навантаження може мінятися на одній і тій же частоті, тобто немає чіткої залежності між моментом навантаження й швидкістю обертання, а також у випадках, коли необхідно одержати розширений діапазон регулювання частоти при номінальних моментах.

Системи векторного керування розділяються на два класи – це бездатчикові та зі зворотним зв'язком. Область застосування дозволяє визначити застосування певного методу. Застосування бездатчикових систем можливе, коли швидкість обертів тягового двигуна електромобіля змінюється не більше чим 1:100, а точність підтримки швидкості становить не більше чим $\pm 0,5$ %. При аналогічних показниках, що становлять 1:1000 $i \pm 0,01$ % відповідно прийнято використовувати системи зі зворотним зв'язком

Перевагами векторного методу керування є швидкість реакції щодо зміни навантаження, а в області малих частот обертання двигуна характеризується плавністю, відсутністю ривків. Регулювання швидкості

виконується при досягненні високої точності. Усі ці переваги стають важливими на практиці використання електромобілів.

Якщо в скалярних перетворювачах частоти об'єктом контролю й керування є тільки магнітне поле статора, то у векторних моделях об'єктом контролю й керування є й магнітне поле статора і ротора, а точніше - їхня взаємодія з метою оптимізації моменту обертання на різних швидкостях. Що стосується методів контролю й керування, то коли застосовується скалярний метод керування - використовується вихідна частота й струм частотного перетворювача, а у випадку з векторним керуванням - вихідна частота, струм і його фаза.

Векторні моделі точніше в роботі, але при цьому потрібна наявність більш точних вимірів.

Якщо необхідно вибрати частотний перетворювач, у першу чергу, необхідно дивитися на область застосування привода електромобіля, і, виходячи з умов його експлуатації, визначитися з вибором методу керування в частотному перетворювачі тягового електроприводу.

Непрямі вимірники положення. Ці спостерігачі застосовуються в бездатчикових приводах. Для виміру положення ротора вони використовують магнітну неоднорідність властивостей двигуна. Наприклад, несиметричність обмоток або неоднорідність магнітної проникності. Останнім часом у літературі досить популярні спостерігачі, що вимірюють, використовують метод високочастотної інжекції. Метод зводиться до генерації силовим інвертором високочастотного тестуючого сигналу й пошуку по реакції на цей сигнал реального положення ротора. Швидкість ротора при цьому оцінюється, як диференціал положення.

З одного боку, він досить складний і характеризується додатковими втратами й підвищеним рівнем шуму. З іншого боку, його точність сильно залежить від властивостей конкретного двигуна. Застосовність цього методу треба розглядати індивідуально.

Вимірники помилки орієнтування. Ці спостерігачі застосовуються в бездатчикових приводах. Вони визначають положення обертової системи координат, використовуючи внутрішні сигнали системи керування, що залежать від помилки її орієнтування. Їх можна назвати адаптивними, тому що вони зводять помилку орієнтування до нуля. По положенню обертової системи координат оцінюється швидкість ротора.

Неадаптивні спостерігачі на основі моделей двигуна. Ці спостерігачі застосовуються в асинхронних приводах з датчиками швидкості або положення. Користуючись формулами моделі електромагнітних процесів двигуна, вони по відомих величинах просто обчислюють оцінки необхідних для регулювання невідомих величин.

Адаптивні спостерігачі на основі моделі двигуна. Дані спостерігачі можуть застосовуватися як у датчикових, так і в бездатчикових приводах. У їхню основу також закладені моделі електромагнітних процесів, що відбуваються у двигуні. Ці спостерігачі будуються, як слідкуючі системи, й крім моделі, містять ще регулятор, що адаптує модель до реальних процесів, що відбуваються у двигуні або приводі. У закордонній літературі вони називаються MRAS – спостерігачами (Motor Referanse Adaptive System), або по-російському, спостерігачами з еталонною моделлю. У даній публікації розглянуто кілька таких систем.

Спостерігачі на основі фільтра Калмана застосовуються в бездатчикових приводах. Цей спостерігач являє собою деякий цифровий фільтр, алгоритм якого будується з урахуванням законів математичної статистики. Він дозволяє відновлювати невідомий параметр, мінімізуючи при цьому вплив перешкод виміру відомих величин. Спостерігач на основі фільтра Калмана характеризується складністю обчислювального алгоритму й теоретично повинен дозволити одержувати високу точність спостереження. Реальна ж точність цього спостерігача залежить від точності знання, що вважаються відомими, параметрів двигуна й привода. На практиці ці параметри точно не

відомі й, більше того, ще можуть і змінюються в процесі роботи. Це обмежує точність і область використання, видалося б, ідеального спостерігача.

Неадаптивний спостерігач потоку дозволяє при знанні кута, струмів і параметрів схеми заміщення двигуна порахувати амплітуду й кут вектора потоку ротора. Опір ротора, необхідний для розрахунків у цих моделях, у процесі роботи двигуна, може досить сильно змінюватися залежно від температури, що суттєво впливає на точність обчислення потоку ротора.

Точність оцінки потоку можна спробувати підвищити за допомогою адаптивного спостерігача опору ротора.

Для оцінки опору ротора пропонується використовувати структуру спостерігача, яка використовувалася для оцінки швидкості. Якщо швидкість відома, то адаптацію моделі в даному спостерігачі можна пробувати робити по будь-якому іншому невідомому параметру. Перше, що спадає на думку – зробити адаптацію по опору ротора, адже його-то нам і треба знати. Однак у моделі повного порядку присутні два термозалежних компонента схеми заміщення.

2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ БУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Електромобіль з зарядною станцією на борту як керована система може ідеалізуватися настільки, що в кожен фіксований момент часу спостереження $t = t'$ на інтервалі $T = \{t \mid t_s \leq t \leq t_f\}$, $t' \in T$ його властивості можуть бути описані двома дійсними числами:

- $\omega(t')$ – поточна кутова швидкість обертання провідних коліс;
- $\theta_{TAB}(t')$ – стан накопичувача енергії (ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї).

Розглядатимемо дані величини як компоненти вектору стану системи $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = [\omega(t), \theta_{TAB}(t)]^T$ у момент часу t' .

Множина всіх можливих станів в різні моменти часу $t \in T$ утворюють двовимірний простір станів \mathbf{X}

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \quad \forall t \in T, \quad \mathbf{X} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{array} \right], \quad (2.1)$$

де ω_{\max} – максимальна кутова швидкість обертання ведучих коліс.

На множині \mathbf{X} можна виділити підмножину експлуатаційних станів

$$\mathbf{X}_{ex} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{array} \right] \subset \mathbf{X}. \quad (2.2)$$

Вихід стану системи за межі \mathbf{X}_{ex} небажаний, хоча і не веде до аварійної ситуації.

Розглядатимемо електромобіль з бортовою станцією як багатовимірний нелінійний стаціонарний об'єкт виду

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}, \quad (2.3)$$

де \mathbf{u} – вектор управління $\mathbf{u} = [\beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma]^T$;

β_D – сигнал управління бортової електростанцією. $\beta_D = -1$ відповідає відключеному стану генератор-ДВЗ;

β_M – сигнал управління силовою установкою (електромагнітним моментом ВЕД);

β_T – сигнал управління системою гальмування;

γ – передавальне число трансмісії автомобіля;

ξ – вектор збурюючих впливів $\xi = \xi(t) = [\alpha(t), \vartheta_0(t)] \in \mathbb{R}^2 \quad \forall t \in T$;

α – коефіцієнт опору дороги;

ϑ_0 – фактор обтічності;

\mathbf{y} – вектор виходу: $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = [V(t), G_T(t), E_T(t)]^T \in \mathbf{Y} \subset \mathbb{R}_+^3 \quad \forall t \in T$;

V – швидкість автомобіля;

G_T – годинна витрата пального ДВЗ зарядної станції;

$E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$ – ступінь токсичності відпрацьованих газів ДВЗ, яка є функцією годинної емісії токсичних компонентів;

C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC} – годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно;

$f(\bullet)$ і $h(\bullet)$ – відомі безперервні або частково-безперервні вектор-функції векторних аргументів, визначені на відповідних множинах.

Вважаємо, що дії, що управляють, мають бути обмежені, тобто $\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4 \quad \forall t \in T$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_D = -1, & 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Вектор управління може бути заданий як програмне управління:
 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [\beta_D(t), \beta_M(t), \beta_T(t), \gamma(t)]^T$ або у вигляді координатного управління:
 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\beta_D(\mathbf{x}), \beta_M(\mathbf{x}), \beta_T(\mathbf{x}), \gamma(\mathbf{x})]^T$.

Компоненти вектора управління в значній мірі визначаються типом бортової електростанції. До складу вектора управління включено керуючий вплив на генератор-ДВЗ.

Основною функцією системи управління електромобілем є виконання завдання стеження, тобто підтримка з мінімальною помилкою заданої швидкості автомобіля $V_{zd}(t)$ за наявності збурень $\xi(t)$, $t \in T$ і обмеженнях на можливі стани системи $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ і допустимі управління $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$, $\forall t \in T$. Крім цього, процес управління повинен задовільняти ряду додаткових умов:

- мінімізації витрати пального бортової електростанції,
- рівня токсичності відпрацьованих газів, відхилення ступеня зарядженості ТАБ від оптимальної.

Кожна з цих умов може виражатися у вигляді відповідного критерію оптимальності – вимоги забезпечення екстремуму деякого функціонала $J_X \in \mathbb{R}_+^1$, залежного від виду функцій $V_{zd}(t)$, $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ и $\xi(t)$, які є аргументами даного функціонала. Критерії оптимальності мають бути узгоджені між собою і з прийнятими обмеженнями для виключення тривіальних або вироджених рішень оптимізаційної задачі і, в той же час, достатньо точно описувати мету оптимізації.

Крім цього, критерії мають бути незалежні і монотонні по перевазі, тобто покращенню якості управління повинне відповідати зменшення значення відповідного критерію.

Для формальної постановки задачі оптимізації управління електромобілем на їздовому циклі, який задається функцією зміни швидкості $V_{zd}(t)$, $t \in T$, визначимо багатокритеріальний (векторний) функціонал якості $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = [J_V, J_\theta, J_G, J_E]^T$, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}_+^4$. Окремими компонентами даного векторного функціонала є критерії оптимальності по кожній з умов, яким повинен задовольняти процес управління.

Внаслідок того, що окремі компоненти векторного функціонала мають різний фізичний зміст і діапазон зміни, їх нормування і приведення до безрозмірних величин може бути виконане згідно виразу

$$\mathbf{J}_i = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_i - \mathbf{J}_{\min.i}}{\mathbf{J}_{O.i} - \mathbf{J}_{\min.i}}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (2.5)$$

де $\tilde{\mathbf{J}}_i$ – значення i -го критерію до нормування;

$\mathbf{J}_{\min.i}$ – мінімально-можливе значення відповідного критерію, отримане в результаті вирішення однокритеріальної задачі оптимізації без урахування решти критеріїв;

$\mathbf{J}_{O.i}$ – середнє значення i -го критерію при управлінні близькому до оптимального на заданому їздовому циклі.

Для випадку, коли $\mathbf{J}_{\min.i} = 0$ можна ввести нормуючі коефіцієнти $\mathbf{K}_{N.i} = \mathbf{J}_{O.i}^{-1}$, $i = \overline{1, 4}$ для кожного з критеріїв: $\mathbf{K}_N = [K_{NV}, K_{N\theta}, K_{NG}, K_{NE}]^T$.

Визначимо критерії оптимальності управління електромобіля на заданому їздовому циклі таким чином за такими критеріями:

1. Критерій точності управління за швидкістю

$$\mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_V(V, T) = K_{NV} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((V_{zd}(t) - V(t))^2 + S_V^2(V(t)) \right) dt, \quad (2.6)$$

де S_V – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів \mathbf{X}_{ex}

$$S_V(V(t)) = \begin{cases} 0, & \text{при } V(t) \leq V_{ex.max}, \\ V(t) - V_{ex.max}, & \text{при } V(t) > V_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.7)$$

$V_{ex.max}$ – максимальна експлуатаційна швидкість. $V_{ex.max} = \omega_{ex.max} \cdot r_{kol}$;

r_{kol} – радіус кочення ведучих коліс;

1. Критерій використання енергії ТАБ

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_\theta(\theta_{TAB}, T) = K_{N\theta} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((\theta_{ex.opt} - \theta_{TAB}(t))^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(t)) \right) dt, \quad (2.8)$$

де $\theta_{ex.opt}$ – оптимальний ступінь зарядженості ТАБ.

S_θ – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів \mathbf{X}_{ex}

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}, \\ |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|, & \text{при } \theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.9)$$

2. Критерій економічності тягового електроприводу

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{J}_G(G_T, T) = K_{NG} \cdot \int_{t_s}^{t_f} G_T^2(t) dt; \quad (2.10)$$

4. Критерій ступеня токсичності відпрацьованих газів ДВЗ бортової електростанції

$$\mathbf{J}_4 = \mathbf{J}_E(E_T, T) = K_{NE} \cdot \int_{t_s}^{t_f} E_T(t) dt, \quad (2.11)$$

де

$$E_T(t) = K_{ENOX} \cdot C_{NOX}^2(t) + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(t) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(t); \quad (2.12)$$

K_{ENOX} , K_{ECO} , K_{EHC} – коефіцієнти токсичності відповідних компонентів відпрацьованих газів. Дані коефіцієнти повинні визначатися з урахуванням впливу компонентів на здоров'я людини і навколишнє середовище, а також їх питомого вмісту у відпрацьованих газах. При цьому повинне виконуватися співвідношення

$$K_{ENOX} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1. \quad (2.12)$$

При обчисленні критеріїв оптимальності інтеграція здійснюється не на всьому інтервалі спостереження T , а в ковзаючому вікні шириною ΔT на інтервалах $[t, t + \Delta T]$ або $[t - \Delta T, t]$.

Враховуючи, що $\mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ надалі можна вважати $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$

Рішення багатокритеріальної задачі оптимізації управління приводить до формування множини \mathbf{U}^P непокрощуваних по Парето (Парето-оптимальних) управлінь $\mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U}^P \subset \mathbf{U}$ [52, 53]

$$\mathbf{U}^P = \left\{ \mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U} \mid \exists \mathbf{u} \in \mathbf{U} : \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \leq \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}^{*P}, T), i = \overline{1, 4}; \mathbf{u} \neq \mathbf{u}^{*P} \right\}, \quad (2.13)$$

де \mathbf{J}_i – i -й компонент векторного функціонала.

Управління, що належать множині \mathbf{U}^P не можуть бути покращувані одночасно по всіх критеріях, тобто вони є незрівняними по векторному функціоналу, оскільки вимоги різних критеріїв суперечливі. Внаслідок цього, виникає проблема вибору єдиного управління з множини Парето на основі

деякої схеми компромісу, при досягненні компонентами функціонала умовних мінімумів. Цей метод працює, коли пріоритет показників установити достатньо важко або неможливо, тоді з множини альтернатив слід шукати ті значення, які краще інших альтернатив по всьому набору показників.

Існує достатньо багато підходів до вирішення даної проблеми, які строго визначають властивості оптимального рішення і те, в якому сенсі оптимальне рішення перевершує решту всіх допустимих рішень.

Одним з підходів до забезпечення єдності рішення задачі векторної оптимізації є використання принципу гарантованого результату (мінімакса), згідно якому за оптимальне вважається управління $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}$, яке доставляє якнайкраще значення як найгіршому критерію якості

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \max_{i=1,4} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T. \quad (2.14)$$

На різних ділянках їздового циклу пріоритети окремих критеріїв, складових векторного функціоналу, можуть змінюватися. Для урахування різного ступеня важливості критеріїв може бути введений вектор

$$\mathbf{K}_P = [K_{PV}, K_{P0}, K_{PG}, K_{PE}]^T \sum_i \mathbf{K}_{P,i} = 1, \quad \mathbf{K}_{P,i} > 0, \quad i = \overline{1,4}.$$

Вибір компонентів вектора \mathbf{K}_P є нетривіальною задачею. Для її вирішення можуть бути використані метод аналізу ієрархій або метод класифікації альтернатив.

Векторна функція оптимального управління при нерівнозначних критеріях

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T, \quad (2.15)$$

де J_{SV} – згортка векторного функціонала якості,

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \max_{i=1,4} \{ \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \}, \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (2.16)$$

Управління, що є рішенням мінімаксної задачі, в порівнянні з іншими управліннями гарантує найбільше віддалення найгіршого з компонентів векторного функціонала від межі області допустимих значень.

Основним недоліком даного підходу є можлива втрата гладкості отримуваної цільової функції $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$, проте у багатьох випадках застосування мінімаксної згортки є достатньо зручним.

Інший підхід до отримання єдиного рішення оптимізаційної задачі передбачає зведення багатокритеріальної оптимізації до однокритеріальної шляхом лінійного згортання векторного критерію в суперкритерій

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (2.17)$$

Простота і наочність даного підходу визначає його найбільше поширення. Разом з тим, ефективне використання лінійної згортки критеріїв можливо тільки у разі, коли парето-оптимальне рішення в просторі критеріїв оптимальності утворюють випуклу множину. Інакше деякі управління $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}^p$ не можуть бути отримані відповідним вибором \mathbf{K}_P . Крім того, у ряді випадків малим приростам вагових коефіцієнтів $\mathbf{K}_{P,i}$, $i = \overline{1,4}$ відповідають великі прирости функціонала J_{SV} , і рішення оптимізаційної задачі може виявитися нестійким.

Задачу оптимізації управління силовою установкою електромобіля сформулюємо таким чином.

Для їздового циклу, визначуваного заданою функцією зміни швидкості автомобіля $V_{zd}(t)$, $t \in T$, знайти управління $\mathbf{u}^*(t)$, яке доставляє мінімум функціоналу $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ і задовольняє прийнятим обмеженням на можливі стани, допустимі управління і обмеженням у вигляді неголономних зв'язків

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (2.18)$$

$$\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0, \quad \forall t \in T. \quad (2.19)$$

При цьому значення J_{SV}^* називатимемо оптимальним значенням функціонала, а векторну функцію

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (2.20)$$

що доставляє функціоналу оптимальне значення – оптимальним управлінням.

Обмеження у вигляді неголономних зв'язків $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$ обумовлені динамічними властивостями електромобіля і визначаються кінематичною схемою силової установки електромобіля.

3 ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Тяговий електропривод електромобіля з підзарядкою від бортової електростанції має можливість використання ДВЗ- генератор для поповнення ємкості ТАБ під час руху. Система ДВЗ-генератор включається в роботу при умовах зниження напруги ТАБ до встановленого значення.

В залежності від умов руху привід ведучих коліс виконується за рахунок тягового електроприводу, отримуючи енергію від ТАБ і генераторної установки (St/G+ДВЗ).

В якості тягового електроприводу (G/M) використовується зворотна електрична машина. Працюючи в генераторному режимі при гальмуванні електромобіля, електрична машина створює необхідний гальмівний момент, забезпечує одночасно рекуперацію залишків енергії.

Після того, як зменшилася ємність ТАБ, включається бортова електростанція, яка виробляє електроенергію і надає її на електродвигун тягового електроприводу, а також на зарядку ТАБ.

Керування розглянутого тягового електроприводу з зарядкою від бортової електростанції виконується на підставі наступних керуючих впливів:

- сигнал керування крутним моментом або гальмівним моментом зворотної електричної машини G/M тягового електроприводу (β_{ω_w});
- положення органу керування бортової електростанції (β_D);
- сигнал керування моментом генератора бортової електростанції (β_G);
- сигнал керування системою гальмування (β_T).

Двигун внутрішнього згоряння, будучи основним двигуном бортової електростанції, багато в чому визначає її показники економічності і екологічної безпеки.

Для вирішення завдань аналізу, синтезу і оптимізації системи управління бортової електростанції, ключовою є проблема ідентифікації статичних і динамічних характеристик (математичній моделі) ДВЗ.

Під математичною моделлю ДВЗ розумітимемо деякого оператора

$$\mathbf{F}_{DVS} : \mathbf{U}_{DVS} \mapsto \mathbf{Y}_{DVS}, \quad (3.1)$$

відповідно до якого кожному вхідному вектору

$$\mathbf{u}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV} \\ \dot{\omega}_{KV} \\ \beta_D \\ \dot{\beta}_D \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{DVS} \in \mathbf{U}_{DVS} \subset \mathbb{R}^4, \quad \forall t;$$

$$\mathbf{U}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV.min} \leq \omega_{KV} \leq \omega_{KV.max} \\ \dot{\omega}_{KV.min} \leq \dot{\omega}_{KV} \leq \dot{\omega}_{KV.max} \\ 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ \dot{\beta}_{D.min} \leq \dot{\beta}_D \leq \dot{\beta}_{D.max} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

ставиться у відповідність вихідний вектор

$$\mathbf{y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS} \\ G_T \\ C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_{DVS} \in \mathbf{Y}_{DVS} \subset \mathbb{R}^5, \quad \forall t;$$

$$\mathbf{Y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS.min} \leq M_{DVS} \leq M_{DVS.max} \\ 0 \leq G_T \leq G_{T.max} \\ 0 \leq C_{NOx} \leq C_{NOx.max} \\ 0 \leq C_{CO} \leq C_{CO.max} \\ 0 \leq C_{HC} \leq C_{HC.max} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

Тобто

$$\mathbf{y}_{DVS} = \mathbf{F}_{DVS}(\mathbf{u}_{DVS}), \quad (3.4)$$

де

$$\dot{\omega}_{KV} = d\omega_{KV}/dt; \quad \dot{\beta}_D = d\beta_D/dt; \quad \omega_{KV.min}, \quad \omega_{KV.max}, \quad \dot{\omega}_{KV.min}, \quad \dot{\omega}_{KV.max} \quad -$$

мінімально і максимально допустимі швидкості обертання і прискорення КВ відповідно;

$\dot{\beta}_{D.min}, \dot{\beta}_{D.max}$ – мінімально і максимально можливі швидкості сигналу, що управляє ДВЗ;

$M_{DVS.min}, M_{DVS.max}$ – мінімальне і максимальне значення ефективного моменту ДВЗ, які є функціями швидкості обертання КВ;

$G_{T.max}$ – максимально можлива годинна витрата пального;

$C_{NOx.max}, C_{CO.max}, C_{HC.max}$ – максимальна годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно.

Оператор моделі \mathbf{F}_{DVS} має бути в певному значенні щонайкраще наближений до невідомого оператора об'єкту \mathbf{F}_{DVS}^* . Близькість операторів оцінюватимемо виключно по близькості їх реакцій на одну і ту ж вхідну дію. Процес ідентифікації математичної моделі полягає у визначенні структури $\mathbf{\Omega}_{DVS}$ оператора \mathbf{F}_{DVS} і вектору невідомих параметрів моделі \mathbf{P}_{DVS}

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{\Omega}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle. \quad (3.5)$$

Отримана в результаті ідентифікації математична модель повинна задовольняти ряду вимог:

– вихід моделі повинен максимально точно, згідно вибраній матриці, відповідати характеристикам ДВЗ, що належать області допустимих експлуатаційних режимів, при одних і тих же вхідних сигналах;

– рівень складності моделі має бути прийнятним з погляду її використання при вирішенні оптимізаційної задачі;

– математичні перетворення, які використовують при побудові моделі, повинні допускати ефективну реалізацію засобами системи комп'ютерної математики MATLAB.

Процес ідентифікації повинен спиратися на експериментально отримані швидкісні і навантажувальні характеристики ДВЗ, забезпечувати простоту налаштування моделі на конкретний тип двигуна, мати достатню перешкодозахищеність, бути автоматичним або автоматизованим.

Важливим питанням у сфері використання енергоресурсів на транспорті є питання енергозбереження. В цьому відношенні автомобіль не може бути винятком. Більш того, для автомобілів це питання має особливе значення, оскільки автомобіль в наш час стає чи не найбільш поширеним технічним засобом, використовуваним людиною в своїй діяльності.

Загально визнано вважати, що великою нацією нас робить не наше багатство, а то, як раціонально ми його використовуємо. Стосовно до автомобіля можна сказати так: «важливо не те, який обсяг перевізної роботи ми виконуємо автомобілем, а то, як раціонально ми його створюємо, які при цьому витрати енергії». У зв'язку з цим, іншим повинен бути і підхід до оцінки якості синергетичних автомобілів. Розробка досить точних моделей, що відображають енергетичні втрати автомобілів у різних умовах експлуатації є найважливішою науковою задачею. Експериментальні дослідження зміни енергетичних втрат при стабільних умовах експлуатації скрутні, тому необхідно створювати досконалі розрахункові аналітичні методи. Вони можуть бути широко використані при проектуванні гібридних автомобілів і створенні нормативної бази для автотранспортних підприємств.

Автомобіль – це силова машина. А, як відомо, продуктивність будь-якої машини визначається потужністю, тобто кількістю механічної роботи, виконаної в одиницю часу. В цьому випадку ККД автомобіля слід відносити до додаткових показників. Адже саме ККД є основним критерієм досконалості автомобіля з енергетичної точки зору. Потужність і ККД – це найважливіші показники.

Як показують різні дослідження виникає гостра необхідність одночасно вимірювати як фактичний обсяг виконаної автомобілем корисної роботи, так і

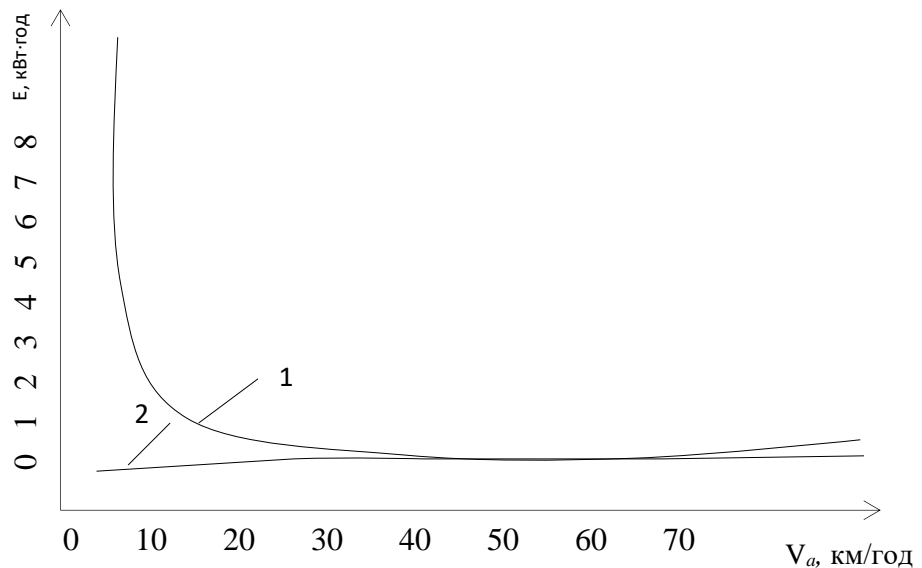
кількість витраченої енергії, і за даними давати оцінку транспортного процесу в цілому за допомогою найважливішого критерію, яким є ККД.

У зв'язку з цим доречно нагадати слова великого італійського вченого Г. Галілея: «вимірювати все, що вимірюється, і прагнути, щоб стало вимірюваним те, що їм ще не є». Роль і значення вимірювань ясно оцінив і великий російський вчений Д.І. Менделєєв, сказавши, що «в природі міра і вага - суть головного знаряддя – пізнання. Наука починається тоді, коли починають вимірювати».

Нафтові палива як джерело енергії мають дуже високими питомими характеристиками: зокрема, в 1 кг бензину міститься 11,6 кВт·год енергії. Акумулятори будь-яких можливих електрохімічних систем мають теоретичний запас енергії приблизно в 6-10 разів менший. З цієї причини, питання раціонального використання наявної на електромобілі енергії є найважливішими для тягових електричних систем будь-яких типів.

Зауважимо, що електричні тягові системи мають набагато менші втрати енергії, ніж системи з тепловими двигунами, в тому числі і з двигунами внутрішнього згоряння. Коефіцієнт корисної дії існуючих теплових двигунів становить 25-30 %, тому тільки близько 3 кВт·год/кг вихідної питомої енергії палива корисно використовується на виході двигуна.

Ступінь корисного використання енергії електрохімічного акумулятора (при сучасному стані техніки) може бути набагато вище, а досягнутий рівень ККД електродвигунів складає 85-90%. Таким чином, рівень корисно використовуваної питомої енергії електрохімічних джерел може досягти 25–30% від наведеної вище величини на виході теплового двигуна. Цей орієнтовний підрахунок показує, що, істотно програючи в вихідній теоретичній енергії енергоносія, електричні тягові системи можуть частково компенсувати це при реалізації наявних можливостей більш ефективного її використання. Ця обставина має важливе значення для оцінки перспектив розвитку екологічних чистих транспортних засобів.



1 – при роботі на бензині, 2 – в режимі електромобіля

Рисунок 3.1 – Зміна енергії, отриманої автомобілем в залежності від середньої швидкості руху

З рисунку видно, що енерговитрати в режимі електромобіля будуть оптимальні при низькій середній швидкості до 40 км/год. При середній швидкості понад 60 км/год ефективно використовувати автомобіль в режимі роботи двигуна внутрішнього згорання. Це викликано тим, що ККД електродвигуна знижується при навантаженні близькою до максимальної, а ККД бензинового двигуна підвищується і буде максимальним при високих навантаженнях.

Розробка досить точних моделей, що відображають енергетичні втрати автомобілів у різних умовах експлуатації є можливістю наукових завдань. Експериментальні дослідження зміни енергетичних втрат при статичних умовах експлуатації скрутні, тому необхідно створювати досконалі розрахункові методи. Вони можуть бути широко використовувані при проектуванні електромобілів і створенні нормативної бази витрати енергії для автотранспортного підприємства.

Автомобіль – це силова машина. А, як відомо, продуктивність будь-якої силової машини визначається потужністю, тобто кількістю (об'ємом)

механічної роботи, виконаної в одиницю часу. Не можна погодитися і з тим, що ККД автомобіля слід відносити до додаткових показників. Адже саме ККД є основним критерієм досконалості автомобіля з енергетичної точки зору. Потужність і ККД – це найважливіші показники. Що стосується роботи – це похідний, причому інтегрального (підсумкового) характеру, показник. Але потужність і робота знаходяться в прямій залежності: чим більше потужність, тим за менший відрізок часу автомобіль може виконати заданий обсяг роботи.

На підставі аналізу енергетичних втрат автомобіля з СУЕ слід, що при низьких середніх швидкостях руху 5...40 км/год дуже ефективно використовувати режим руху на електротязі, а при середніх швидкостях вище 60 км/год – рух з використанням бортової електростанції. Очевидно, що електромобілі найбільш ефективно використовують енергію на виконання транспортної роботи на відміну від інших видів транспортних машин.

ВИСНОВКИ

Натурні випробування підтвердили ефективність використання векторного керування в частотних перетворювачах тягового електроприводу. Завдяки чому подовжує пробіг на одному заряді, тобто енергоефективність підвищилась. При потребі більш високих потужностей розроблена система яка легко масштабується от кіловат до сотень кіловат, за принципом зміщенні центру тяжіння.

Застосування літій-іонних батарей дозволяє суттєво підвищити удільну щільність зберігання енергії в АКБ. В наслідок чого доля корисного навантаження підвищується. Є ціль цього питання в напрямку суперконденсаторів. Літієві комірки які застосовуються практично не потребують технічного обслуговування.

Відпрацьовані батареї, що втратили номінальну ємність не представляють загрози для екології тому що їх в подальшому можна використовувати як стаціонарні буферні накопичувачі енергії, в житлових приміщеннях або іншого призначення. В наслідок високої вартості паливно-мастильних матеріалів використання електроенергії представляється нам більш перспективним, з точки зору економічних показників.

Ємності батареї (3,6 кВт) хватає на більш розповсюджені операції. Що потребують довготривалої роботи без підзарядки. Час повної зарядки батареї складає 3,5 години. Завдяки особливостям характеристик електроприводу на базі нього легко створюються мобільні систем з автопілотом.

Система на 20% ефективніша своїх аналогів, що є хорошим результатом.

Область застосування (з вимогою – без вихлопних газів):

– транспортування пасажирів і вантажів: на базах відпочинку, санаторіях, в закритих приміщеннях (вокзалах, супермаркетах, промислових підприємствах);

– с/г підприємства: пташники, тваринницькі ферми, теплиці та інші закриті приміщення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кенио Т., Нагамори С. Двигуни постійного струму з постійними магнітами. М.: Енергоатомиздат. 1989 р. - 184 с.
2. Новиков Г. В. Частотное управление асинхронными двигателями. Москва. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016 – 498 с. страница 37
3. Кочетков В.П., Бражников А.В., Дубровский І.Л. Теорія електропривода. - Красноярськ: Видавництво Крпи, 1991. - 140 с.
4. Москаленко О. Вісім екологічних проблем України. 2011. URL: <https://news.finance.ua/ua/news/-/235280/visim-ekologichnyh-problem-ukrayiny> (дата звернення: 13.12.2018).
5. Енергозбереження засобами електроприводу. 2013. URL: http://4exam.info/book_152_glava_49_5.1._Energozberezhennja_zasobami_elektroprivodu.html (дата звернення: 13.12.2018).
6. Виставка Електротранс. 2019. URL: <http://www.electrotrans-expo.ru> (дата звернення: 24.10.2019).
7. Електричний привід. 2019. URL: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Электрический_привод (дата звернення: 24.10.2019).
8. Що таке електропривод. 2008. URL: <http://elprivod.nmu.org.ua/ua/entrant/electricdrive.php> (дата звернення: 25.10.2019).
9. Регульований електропривод як засіб енергозбереження. 2014. URL: <http://electricalschool.info/econom/1283-reguliruemyyj-jelektroprivod-kak.html> (дата звернення: 26.10.2019).
10. Електромобіль. 2018. URL: <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Электромобиль> (дата звернення: 28.10.2019).