

ПОРІВНЯННЯ ТЯГОВО-ШВИДКІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛІВ З ДВЗ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Математичний опис механічної характеристики вентильного електродвигуна [1, 2, 3] (далі ВЕД) є досить складним завданням через те, що магнітний потік поблизу насичення (або «коліна») петлі гістерезису не лінійно залежить від струму в обмотках двигуна. Це пов'язано з тим, що ЕРС обертання двигуна і електромагнітний момент пропорційні добутку потоку відповідно на швидкість ротора і струм якоря. У багатьох випадках можна припустити, що двигун з незалежним збудженням працює при постійному потоці збудження, таке припущення допустимо, якщо ротор виконаний з висококоерцитивних постійних магнітів, або система збудження має компенсацію реакції якоря, (що необхідно зробити також і в ВЕД на основі автомобільного генератора).

Тоді, якщо виключити з розгляду зону короткочасних перевантажень по струму якоря, рівняння токоскоростної і механічної характеристик лінеарізуються, а математичний опис процесів перетворення енергії в вентильному двигуні спрощується, що дозволяє з прийнятною на практиці точністю аналізувати роботу двигуна і розраховувати основні інтегральні параметри тягового електроприводу.

У якості тягових ВЕД використовують синхронні машини, включені за схемами з досить малим межкомутаційним інтервалом. Це також відноситься і до трифазної схеми з реверсивним живленням, обраної нами для інвертора ВЕД, на базі потужного автомобільного генератора. Зі зменшенням межкомутаційного інтервалу, зменшуються пульсації крутного моменту і інших параметрів ВЕД. Зменшенню цих пульсацій також сприяє застосування в автомобільних генераторах дзьобоподібних (кігтеподібних) полюсів ротора. Для таких ВЕД може бути використана

стандартна модель узагальненої електричної машини в припущенні нескінченно малого межкомутаційного інтервалу і без урахування реакції якоря на магнітний потік збудження. Рівняння балансу напруг для обмотки збудження і рівняння балансу напруг для якірного ланцюга буде мати вигляд:

$$u_B = i_B R_B + L_B di_B / dt \quad (1)$$

$$u_{\text{я}} = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} di_{\text{я}} / dt + e \quad (2)$$

де: $u_{\text{я}}$ - напруга живлення якоря ВЕД; u_B - напруга живлення обмотки збудження ВЕД; e - ЕРС обертання; R - сумарний опір якірного ланцюга; R_B - сумарний опір ланцюга обмотки збудження; i_B - миттєве значення струму обмотки збудження; $i_{\text{я}}$ - миттєве значення струму якоря; $L_{\text{я}}$ - сумарна індуктивність ланцюга якоря; L_B - сумарна індуктивність ланцюга обмотки збудження.

З огляду на наявність постійного потоку збудження в разі сталого (статичного) режиму, коли $L_B di_B / dt = 0$ та $L_{\text{я}} di_{\text{я}} / dt = 0$, необхідно і достатньо розглянути тільки статичне рівняння балансу напруг якірного ланцюга ВЕД, яке приймає вид:

$$U - E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 0 \quad (3)$$

де: U - напруга живлення ВЕД;

E - ЕРС обертання;

$I_{\text{я}}$ - струм якоря.

Визначимо ЕРС обертання E для ВЕД. ЕРС кожного провідника обмотки статора ЕПР, перетинаємою обертним магнітним полем ротора визначається за законом індукції і дорівнює:

$$e_{np} = Blv \quad (4)$$

де B - магнітна індукція;

l - довжина провідника;

v - відносна швидкість переміщення провідника.

Середнє значення ЕРС провідника при відносному переміщенні ротора в межах полюсного поділу можна визначити через середнє значення магнітної індукції:

$$e_{np.cp} = B_{cp}lv \quad (5)$$

Введення поняття середнього значення ЕРС провідника $e_{np.cp}$ і середнього значення індукції B_{cp} в рамках даного математичного моделювання можливо тому, що вони строго входять в середнє значення добутку $k\Phi$, яке, як буде описано нижче, знайдемо розрахунково-експериментальним (розрахунково-емпіричним) шляхом з використанням виміряних середніх значень напруг і кутової швидкості для холостого ходу ВЕД. Якщо обмотка якоря має N активних провідників і $2a$ паралельних гілок, то число послідовно з'єднаних провідників в кожній паралельній гілці буде $N/2a$. Тоді середнє значення ЕРС машини:

$$E = B_{cp}lv \frac{N}{2a} \quad (6)$$

Швидкість перетину магнітного поля провідниками буде:

$$v = \omega r \quad (7)$$

де: ω - кутова швидкість ротора ВЕД;

r - радіус розточення статора.

Магнітний потік збудження Φ за визначенням дорівнює:

$$\Phi = \frac{2\pi rl}{2p} B_{cp} \quad (8)$$

де: $2p$ - число полюсів ВЕД.

(p число пар полюсів), величина $2\pi r l / 2p$ являє собою поверхню сердечника якоря, що припадає на один полюс.

Звідси середнє значення магнітної індукції буде:

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\frac{2\pi r l}{2p}} \quad (9)$$

Підставивши (7) і (9) в (6) маємо:

$$E = k\Phi\omega \quad (10)$$

В (10) використано позначення:

$$k = pN / (2\pi a) \quad (11)$$

Величина k називається конструктивний коефіцієнт. Для отримання рівняння балансу потужностей помножимо рівняння (2.3) на I_a

$$UI_a - EI_a - R_a I_a^2 = 0 \quad (12)$$

де: $UI_a = P$ - повна споживана електрична потужність.

Переписавши отриманий баланс потужностей бачимо, що величина P складається з двох складових:

$$P = EI_a + R_a I_a^2 \quad (13)$$

Друга складова — це втрати на нагрів якірного ланцюга, а перша - та частина повної потужності, яка перетворюється в механічну потужність. Механічна потужність може бути записана як $M\omega$, де M механічний момент на валу електродвигуна, тому з урахуванням (2) маємо:

$$EI_a = k\Phi\omega I_a = M\omega \quad (14)$$

Отже, для механічного моменту маємо вираз:

$$M = k\Phi I_{я} \quad (15)$$

Результати розрахунків зведемо у таблицю 1

Таблиця 1 - Результати розрахунків ВЕД

Частота обертання ротора хв ⁻¹		0	2500	5000	7500	10000	12500	15000
Крутний момент Н*м	Nissan Leaf	280	280	275	230	150	110	50
	Renault Zoe	220	220	220	185	110	73	30
Потужність КВт	Nissan Leaf	0	60	78	80	80	74	30
	Renault Zoe	0	50	62	65	65	58	20

Тягово-швидкісні властивості автомобіля — це сукупність властивостей, що визначають можливі за характеристиками двигуна, або зчеплення ведучих коліс з дорогою, діапазони зміни швидкостей руху і граничні інтенсивності розгону автомобіля при його роботі на тяговому режимі в різних дорожніх умовах.

Основні тягово-швидкісні характеристики електромобілів:

- Максимальна швидкість руху на перегоні заданої довжини при розрахунковому навантаженні на горизонтальній прямій ділянці дороги, км / год;
- Час розгону з місця до заданої швидкості з розрахунковим навантаженням на горизонтальній прямій ділянці дороги, м / с;
- Запас ходу при розрахунковому навантаженні по трасі, профіль якої визначається прийнятими стандартними перегонами і частотою їх повторюваності, з використанням 80-90% повної енергоємності ТАБ, км;
- Найбільший підйом, який може здолати електромобіль з розрахунковим навантаженням,%;
- Еквівалентний струм електродвигуна, Ід екв, А;

- Середній струм, споживаний електродвигуном за період руху $I_{д\text{ ср}}$, А;
- Витрата енергії на розрахунковому перегоні, $W_{пер}$, Вт · год / км;
- Питома витрата енергії на одиницю маси електромобіля на розрахунковому перегоні, W , Вт · год / т · км;
- Питома витрата енергії на одиницю маси корисного вантажу G на розрахунковому перегоні, W , Вт · год / т · км.

До порівняння пропонуються три автомобілі одного класу з типом кузова «хетчбек» - електромобілі Nissan Leaf 2013, Renault Zoe, та бензиновий Ford Focus 1.6 л. У таблицю 2 зведені технічні характеристики цих автомобілів.

Таблиця 2 - Технічні характеристики порівнюємих автомобілів

Автомобіль	Nissan Leaf 2013	Renault Zoe	Ford Focus 1.6
Тип кузова	Хетчбек	Хетчбек	Хетчбек
Кількість місць	5	5	5
Потужність двигуна, кВт	80	65	77
Крутний момент, Н*м	280	220	150
Запас ходу, км	135-172	145	-
Максимальна швидкість, км/год	145	135	180
Розгін 0 – 100, сек	11,9	13,5	12,3
Повна маса, кг	1521	1468	1825
Тип приводу	Передній	Передній	Передній
Ємність батареї, кВт*год	24	22	-
Час заряду, год			
220В	7-8	6-9	-
380В	3	1	-
Швидка зарядка	0,5	0,5	-

Автомобілі будемо порівнювати за графіками моментів, потужностей, та часу розгону до 100 км/год.

Дані залежності крутного моменту та потужності від частоти обертів валу двигуна для електромобілів взяті із табл. 2.1. Для автомобіля Ford Focus ці значення розрахуємо за формулами:

$$N_e = N_{max} \left(A_1 \cdot \frac{n}{n_N} + A_2 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right) \quad (16)$$

$$M_e = 9550 \cdot \frac{N_e}{n} \quad (17)$$

де - N_e, M_e, n поточні значення потужності, крутного моменту, частоти обертання колінчастого валу двигуна відповідно;

$A_1 = 1; A_2 = 1$ - емпіричні коефіцієнти, які застосовуються при розрахунку зовнішньої швидкісної характеристики карбюраторного двигуна.

Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Залежність крутного моменту та потужності двигуна від частоти обертання колінчастого валу.

Частота обертання колінчастого валу хв^{-1}	700	1583	2466	3350	4233	5116	6000	6883,3
Потужність КВт	9,90	24,2	39,3	53,5	65,6	73,9	77	73,4
Крутний момент Н*м	135,1	146,3	152,2	152,7	148	137,9	122,5	101,8

Аналізуючи отриманий графік, можна зробити висновок, що електродвигун Nissan Leaf потужніший за обидва інші двигуни на всьому діапазоні обертів. Бензиновий двигун Ford Focus потужніший за електродвигун Renault Zoe лише на обертах приблизно від 3800 - 8000.

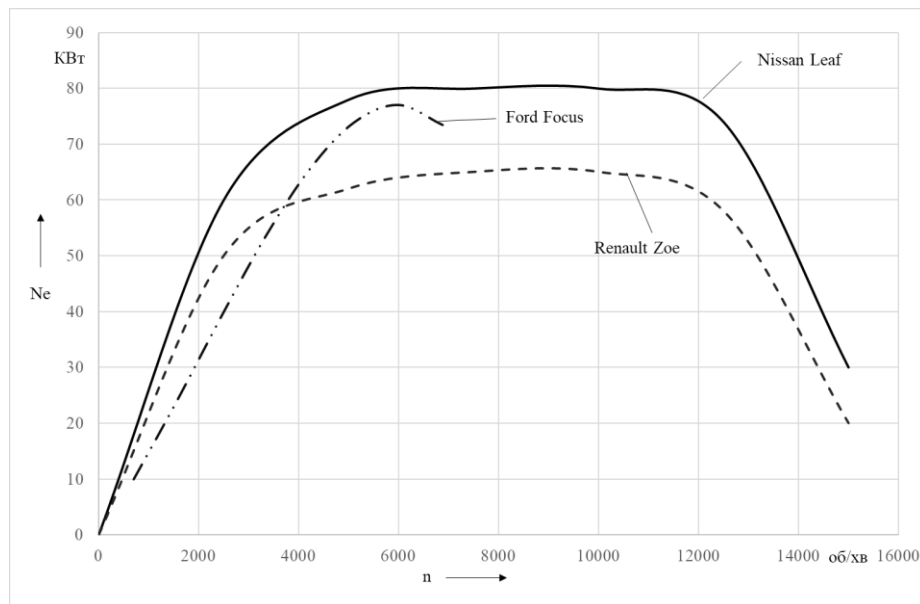


Рисунок 1 - Порівняння потужностей двигунів

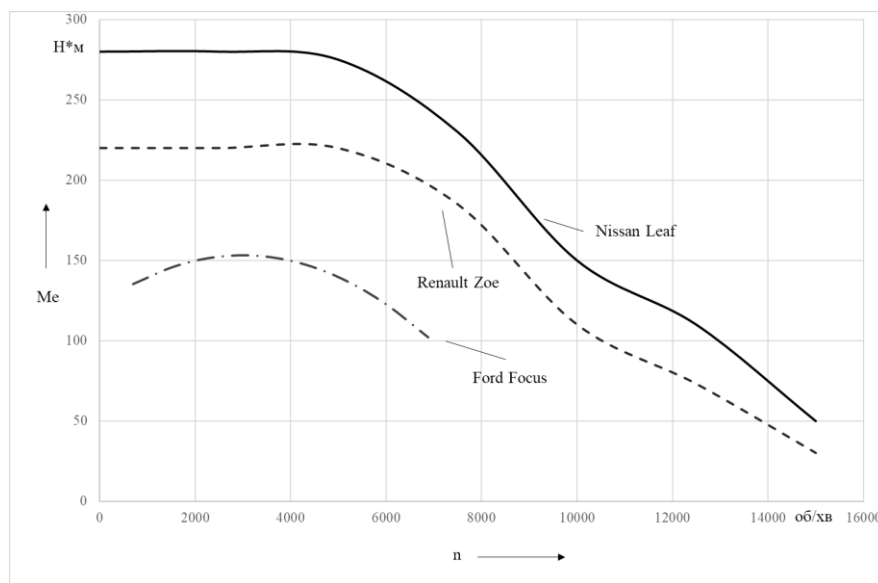


Рисунок 2 - Порівняння крутних моментів двигунів

На цьому графіку наглядно представлена одна з основних переваг електродвигунів над двигунами внутрішнього згоряння - максимальний крутний момент у них досягається з мінімальних обертів. Крім того, самі по собі, електродвигуни мають більший крутний момент ніж ДВЗ.

Час розгону для автомобілів визначався експериментальним шляхом - за допомогою відеоматеріалів, на яких представлений розгін автомобілю з

місця, та секундоміру. Кожну секунду дані зі спідометру заносилися у таблицю, і були отримані наступні результати:

Таблиця 4 - Результати вимірювання часу розгону

Час, сек		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13
Швидкість, км/год	Nissan Leaf	0	18	35	48	59	68	76	83	89	95	100	110	114
	Renault Zoe	0	17	30	43	54	62	69	75	81	86	90	97	100
	Ford Focus	0	12	26	32	42	52	63	65	71	79	86	93	98

За даними з таблиці 4 побудований графік (рис. 3) залежності швидкості автомобіля від часу.

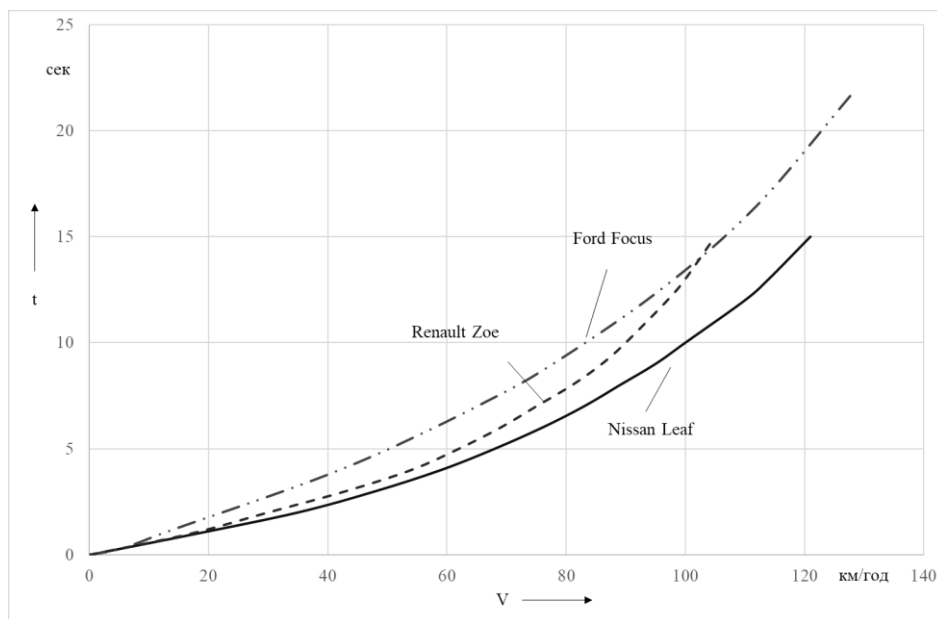


Рисунок 3 - Порівняння часу розгону автомобілів

Аналізуючи графік бачимо, що отримані значення розгону близькі до значень, наданих заводом-виготовником, а Nissan Leaf, досяг швидкості у 100 км/год за 10 секунд, це навіть швидше, ніж вказано у його технічних характеристиках. З трьох автомобілів, першим відмітку у 100 км/год, перетнув Nissan Leaf, другим - Renault Zoe, третім - Ford Focus.

Перелік посилань

1. Электрический автомобиль [Электронный ресурс] // SystemsAuto.ru. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <http://systemsauto.ru/engine/electric-car.html>.
2. Двадненко В. Я. Математична модель тягового вентильного електродвигуна в режимі рекуперативного гальмування // Вістник ХНАДУ : журнал. 2015 р. — № 70.
3. YOUR DRIVING COSTS. How much are you really paying to drive? [Электронный ресурс] // AAA. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: http://exchange.aaa.com/wp-content/uploads/2017/08/17-0013_Your-Driving-Costs-Brochure-2017-FNL-CX-1.pdf.

Науковий консультант: проф., д.т.н. Волков В.П.