

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.73>
УДК 004.94:620.91

Асинхронний тяговий електропривод для дешевого міського легкового транспортного засобу

Войтенко Володимир Андрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; voitenko@op.edu.ua, Scopus Author ID: 57344261700

Водічев Володимир Анатолійович¹⁾

Д-р техніч. наук, професор каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7204-1149>; vva@op.edu.ua, Scopus Author ID: 6602754799

Калінін Олександр Георгійович¹⁾

Старший викладач каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; kalinin.a.g@op.edu.ua

Гладченко Володимир Олександрович¹⁾

Інженер каф. Динаміки і механічної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0220-1509>; gladec@opu.ua

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Сформульовано основні принципи щодо проектування і виробництва дешевого міського легкового електромобіля. Проведено аналіз технічних параметрів трансмісії дешевого міського легкового автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння, на базі якого має бути виготовлено дешевий міський легковий електромобіль. Сформульовано вимоги до технічних параметрів дешевого міського електромобіля. Проведено аналіз залежності сили опору руху електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі. Розраховано залежність значення потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості руху електромобіля. Визначено залежність кількості механічної енергії, яку витрачають приводні колеса електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі на відстань, яка відповідає вимогам до технічних параметрів дешевого міського електромобіля. На підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено значення максимальної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна при максимальній швидкості руху автомобіля на вишій передачі коробки перемикання передач. На підставі значення потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса повного автомобіля під час руху автомобіля по горизонтальній дорозі на максимальній швидкості визначено потужність тягового двигуна. Вибрано тяговий асинхронний електричний двигун і перетворювач частоти до нього. На підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено силу тяги приводних коліс електромобіля, яка відповідає номінальному значенню механічного моменту тягового двигуна на всіх передачах коробки перемикання передач. Також на підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено швидкість руху електромобіля, яка відповідає номінальному значенню кутової швидкості валу тягового двигуна на всіх передачах коробки перемикання передач. Визначено максимальний момент навантаження на валу тягового двигуна при мінімальній швидкості руху автомобіля на першій передачі коробки перемикання передач вгору по дорозі з ухилом 36%. На підставі максимального моменту навантаження на валу тягового двигуна визначено вимоги до номінальних параметрів перетворювача частоти і вибрано перетворювач частоти для тягового асинхронного електричного двигуна. На підставі номінальних параметрів перетворювача частоти сформульовано вимоги до електричних параметрів акумуляторної батареї бортового джерела електричної енергії електромобіля. Розраховано основні технічні параметри бортового джерела електричної енергії електромобіля. Проведено синтез параметрів тягового електропривода електромобіля. Розроблено математичну модель асинхронного тягового електропривода електромобіля. На математичній моделі проведено дослідження електромеханічних перехідних процесів, які відбуваються в асинхронному тяговому електроприводі електромобіля при розгоні і при гальмуванні електромобіля.

Ключові слова: електромобіль; асинхронний двигун; акумуляторна батарея; електрична енергія; математична модель

Метою роботи є розробка асинхронного тягового електропривода змінного струму, призначеного для дешевого міського легкового електромобіля, та проведення аналізу електромеханічних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі електромобіля під час його руху.

Електромобілі набувають усе більшого застосування в усьому світі. Сьогодні використання електромобілів дозволяє їх власникам зменшувати витрати на експлуатацію власного транспортного засобу (ТЗ) і менше забруднювати навколишнє середовище [1,2]. До основних проблем, які перешкоджають масовому розповсюдженню електромобілів в Україні можна віднести велику вартість електромобілів.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Одним з можливих способів зменшення вартості електромобіля є виготовлення електромобіля на базі автомобіля, який має двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) [3, 4], і організація паралельного серійного випуску електромобілів, побудованих на базі автомобілів з ДВЗ, які вже випускаються серійно [5]. Для зменшення вартості виготовлення електромобіля на базі автомобіля з ДВЗ треба при розробці електромобіля використовувати якомога більше елементів і вузлів механічної трансмісії базового автомобіля з ДВЗ. Тому найбільш дешевий варіант проектування і виготовлення електромобіля полягає в заміні ДВЗ на електричний двигун і в заміні бензобаку на перетворювач електричної енергії і акумуляторну батарею (АБ). АБ відноситься до найбільш коштовних і найменш довговічних елементів електромобіля. Вага і вартість АБ суттєво залежить від кількості енергії, яка має бути накопичена в АБ. Для зменшення ваги і вартості АБ треба використовувати АБ якомога меншої ємності. Тому найбільш дешевою буде АБ для електромобіля, призначеного для пересування в місті на відстань від 50 км до 100 км.

Електромобіль буде більш дешевим, якщо в ньому використовувати найбільш дешевий тяговий двигун. До найбільш дешевих, легких і надійних двигунів належать асинхронні двигуни (АД) з короткозамкнутою обмоткою ротора. Тому з метою зменшення вартості електромобіля і підвищення його надійності бажано в електромобілях застосовувати тягові АД. Для керування АД треба використовувати найбільш дешеві перетворювачі частоти (ПЧ). Для підвищення надійності роботи ПЧ треба обмежити їх максимальне навантаження на рівні номінального значення.

Таким чином можна стверджувати, що проблема переобладнання транспортних засобів з ДВЗ на електричні транспортні засоби (ЕТЗ) з мінімальною зміною конструкції базового автомобіля з ДВЗ є актуальною.

Розглянемо проблему переобладнання транспортних засобів з ДВЗ на ЕТЗ на прикладі автомобіля ЗАЗ-968М. Основні технічні параметри автомобіля ЗАЗ-968М приведені у Табл. 1 [6, 7].

Таблиця 1. Основні технічні параметри автомобіля ЗАЗ-968М (джерело: [6])

Найменування параметра	Значення
Коефіцієнт опору повітря	0.43 Нс ² /м/кг
Повна маса автомобіля	1200кг
Корисне навантаження автомобіля	450кг
Максимальна швидкість руху автомобіля	120 км/год
Час розгону від 0 до 100 км/год з водієм та з одним пасажиром	32.0 с
Максимальний підйом, який може подолати автомобіль	36 % (20°)
Номінальна потужність ДВЗ/при частоті обертання валу ДВЗ	30.8 кВт/при 4400 об/хв
Максимальний обертаючий момент ДВЗ/при частоті обертання валу ДВЗ	74.5 Н·м/при 3000 об/хв
Передаточні числа на відповідній передачі механічної коробки перемикачів:	1-ша передача – 3.800 2-га передача – 2.120 3-тя передача – 1.409 4-та передача – 0.964 Задня передача – 4.156
Передаточне число головної передачі	4.125
Розмір радіальних шин	155/70 R13

На підставі технічних параметрів автомобіля ЗАЗ-968М можна сформулювати вимоги до технічних параметрів електромобіля, побудованого на його базі. Основним принципом при визначенні вимог до параметрів електромобіля є те, що його параметри мають бути не гіршими за ті параметри автомобіля ЗАЗ-968М, з врахуванням вимог законодавства.

Наприклад, треба звернути увагу на те, що в Україні максимальна швидкість руху автомобілів в місті обмежена на рівні 50 км/год [8]. Тому для виконання обгону максимальна швидкість пересування міського електромобіля може бути не більшою 70 км/год.

Для зменшення вартості електромобіля треба використати трансмісію базового автомобіля ЗАЗ-968М. Перша передача коробки перемикачів передач (КПП) має забезпечити електромобілю велику силу тяги, яка дозволить долати підйом дороги (до 36%). Четверта передача КПП має забезпечити достатньо велику максимальну швидкість руху електромобіля по горизонтальній дорозі (70 км/год.). Окрім того, застосування інших передач КПП дозволяє покращити динамічні властивості ЕТЗ завдяки збільшенню сили тяги приводних коліс електромобіля і, відповідно, збільшенню прискорення при розгоні ЕТЗ.

Зрозуміло, що габаритні розміри електромобіля дорівнюють габаритним розмірам базового автомобіля ЗАЗ-968М, а максимальна повна маса ЕТЗ не повинна перевищувати повну масу автомобіля ЗАЗ-968М. Тому значення сили опору руху електромобіля визначаємо для габаритних розмірів і повної маси базового автомобіля ЗАЗ-968М (1200 кг).

В Табл. 2 надано результати розрахунку значень сили опору повітря ($F_{\text{оп.пов}}$) [9,10] і сумарної сили опору руху ($F_{\Sigma\text{оп}}$) електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю (V). В Табл. 2 також надано результати розрахунку залежності значення потужності механічної енергії (P_K), яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі, а також результати розрахунку залежності значення кількості енергії (A_K), яку мають витратити приводні колеса електромобіля, при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю на відстань 100 км.

Також була визначена сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% без врахування сили опору повітря:

$$F_{\Sigma,36\%} = 4225.38 \text{ Н.} \quad (1)$$

Таблиця 2. Результати розрахунку сили опору руху, потужності і енергії

V , км/год.	V , м/с	$F_{\text{оп.пов}}$, Н	$F_{\Sigma\text{оп}}$, Н	P_K , Вт	A_K , МДж
0,36	0.1	0,0051	211,9051	21,19	21,191
10	2.78	3,94	215,84	600,04	21,584
20	5.56	15,78	227,68	1265,90	22,768
30	8.33	35,41	247,31	2060,09	24,731
40	11.11	62,99	274,89	3054,03	27,489
50	13.89	98,46	310,36	4310,90	31,036
60	16.67	141,81	353,71	5896,35	35,371
70	19.44	192,86	404,76	7868,53	40,476
80	22.22	251,96	463,50	10299,00	46,350
90	25,00	318,95	530,85	13271,25	53,085
100	27,78	393,78	605,68	16825,79	60,568

Функціональну схему електромеханічної трансмісії електромобіля показано на рис. 1. Основні елементи і вузли трансмісії електромобіля позначено цифрами: 1 – бортове джерело електричної енергії електромобіля; 2 – перетворювач частоти (ПЧ); 3 – тяговий електродвигун; 4 – КПП; 5 – головна передача з диференціалом; 6 – пів-осі приводних коліс; 7 – приводні колеса електромобіля.

На підставі типу шини автомобіля ЗАЗ-968М, який вказано в табл. 1, було визначено статичний радіус шини приводного колеса [9, 10]:

$$R_{\text{СТ}} = 0.257 \text{ м.} \quad (2)$$

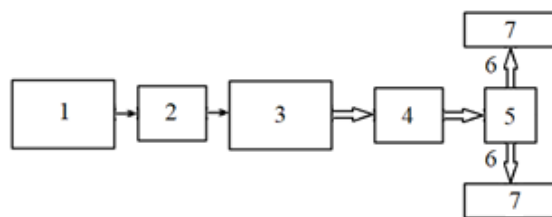


Рис. 1. Функціональна схема трансмісії електромобіля

На підставі значень передавальних чисел КПП і передавального числа головної передачі, наведених в Табл. 1, було розраховано передавальні числа трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП за формулою (3):

$$i_{\text{ТРАНС.і}} = i_{\text{КПП.і}} i_{\text{ГП}}, \quad (3)$$

де $i_{\text{КПП.і}}$ – передавальне число КПП на i -й передачі, від.од.; $i_{\text{ГП}}$ – передавальне число головної передачі, від.од..

Результати розрахунку передавальних чисел трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП надано в табл. 3.

За формулою (4) було визначено кутову швидкість з якою має обертатися вал тягового двигуна на 4-й передачі КПП, якщо максимальна швидкість руху електромобіля дорівнює 70 км/год (19.44 м/с):

$$\omega_{\text{АД.4.70.}} = \frac{V_{\text{ЕТЗ.70.}} \cdot i_{\text{ТРАНС.4}}}{R_{\text{СТ}}} \quad (4)$$

$$\omega_{\text{АД.4.70.}} = \frac{19,44 \times 3,977}{0,257} = 257,01 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

де $V_{\text{ЕТЗ.70.}} = 19.44$ м/с – максимальна швидкість руху електромобіля (70 км/год.); $i_{\text{ТРАНС.4}} = 3.977$ – передавальне число електромеханічної трансмісії електромобіля на 4-й передачі КПП (Табл. 3); $R_{\text{СТ}} = 0.257$ м – статичний радіус приводного колеса (2).

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною швидкістю (70 км/год.) на найвищій 4-й передачі КПП необхідно, щоб номінальна кутова швидкість вала тягового двигуна була не менше 257.01 рад/с (2454.3 об/хв).

На підставі результатів розрахунку потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля (табл. 2), треба визначити потужність, яку має розвивати тяговий двигун при русі електромобіля по горизонтальній дорозі на швидкості 19,44 м/с (70 км/год.).

Номінальна потужність тягового двигуна має відповідати умові (5):

$$P_{\text{АД.Н}} \geq \frac{P_{\text{АД.70.Н}}}{\eta_{\text{ТРАНС}}}, \quad (5)$$

$$P_{\text{АД.Н}} = \frac{7868,53}{0,85} = 9257,1 \text{ Вт},$$

де $P_{\text{АД.70.Н}} = 7868.53$ Вт – потужність механічної енергії, яку розвивають приводні колеса електромобіля при русі ЕТЗ по горизонтальній дорозі з лінійною швидкістю 70 км/год (табл. 2); $\eta_{\text{ТРАНС}} = 0.85$ – ККД механічної трансмісії електромобіля.

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю 70 км/год. на найвищій (4-й) передачі КПП необхідно, мати тяговий АД, номінальна потужність якого має бути не менше 9257,1 Вт, а номінальна кутова швидкість вала тягового двигуна має бути не менше 257,01 рад/с (2454,3 об/хв.).

В зв'язку з цим було обрано тяговий асинхронний двигун типу 4А132М2У3 зі ступенем захисту IP44 з номінальною потужністю 11 кВт і з номінальним значенням синхронної

кутової швидкості обертання валу 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Маса АД типу 4A132M2Y3 дорівнює 93 кг. Для зменшення напруги акумуляторної батареї фази обмотки статора АД з'єднаємо трикутником.

Запишемо рівняння зв'язку (6) між значенням лінійної швидкості руху електромобіля ($V_{ET3.i}$) і номінальним значенням кутової швидкості обертання валу тягового двигуна:

$$V_{ET3.i} = \frac{\omega_{AD.H.0} \cdot (1 - s_H)}{i_{TRANS.i}} R_{CT}, \quad (6)$$

де $\omega_{AD.H.0} = 314.16$ рад/с – номінальне значення синхронної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна типу 4A132M2Y3; $s_H = 0.023$ – номінальне ковзання валу тягового АД типу 4A132M2Y3; $i_{TRANS.i}$ – передавальне число механічної трансмісії електромобіля на i -й передачі КПП (Табл. 3).

За формулою (6) було розраховано значення лінійної швидкості руху електромобіля на усіх передачах КПП при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового двигуна з врахуванням передавальних чисел трансмісії електромобіля на відповідних передачах КПП (табл. 3).

Таблиця 3. Результати розрахунку значення швидкості руху електромобіля і сили тяги

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $i_{TRANS.i}$	V_{ET3} , м/с	V_{ET3} , км/год.	$F_{ET3.H.i}$, Н
1	15.675	5.151	18.54	1967.3
2	8.745	9.236	33.24	1097.5
3	5.812	13.892	50.01	729.4
4	3.977	20.302	73.09	499.1
Задній хід	17.144	4.710	16.95	2151.6

Визначимо номінальне значення рушійного моменту тягового АД типу 4A132M2Y3 за формулою (7):

$$M_{AD.H} = \frac{P_{2H}}{\omega_{AD.H.0} \cdot (1 - s_H)}; \quad (7)$$

$$M_{AD.H} = \frac{11000}{314,16 \cdot (1 - 0,023)} = 35,84 \text{ Нм.}$$

де $P_{2H} = 11000$ Вт – номінальне значення механічної потужності тягового двигуна типу 4A132M2Y3.

За допомогою рівняння (8) визначимо силу тяги, яку будуть розвивати приводні колеса електромобіля на кожній передачі КПП ($F_{ET3.H.i}$), якщо вал тягового АД буде розвивати номінальне значення рушійного моменту ($M_{AD.H} = 35,84$ Нм):

$$F_{ET3.H.i} = \eta_{TRANS} \cdot i_{TRANS.i} \frac{M_{AD.H}}{R_{CT}}. \quad (8)$$

Результати розрахунку заносимо до табл. 3.

Порівняємо результати розрахунку значення сили опору руху електромобіля вгору по дорозі з кутом нахилу $\alpha = 20^\circ$ (36 %), яке було розраховано за формулою (1), і значення сили тяги електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (табл. 3).

За формулою (9) визначимо кратність перенавантаження тягового двигуна по моменту:

$$\lambda_1 = \frac{F_{\Sigma 36\%}}{F_{ET3.H1}}, \quad (9)$$

$$\lambda_1 = \frac{4225,38}{1967,26} = 2,148,$$

де $F_{\Sigma 36\%}$ – сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% без врахування сили опору повітря; $F_{\text{ет3.н1}}$ – сила тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні рушійного моменту тягового АД типу 4A132M2Y3 (табл.3).

Відповідно до параметрів асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3 його перенавантажувальна здатність за моментом дорівнює:

$$\frac{M_K}{M_{\text{ад.н}}} = 2,8. \quad (10)$$

де M_K – критичний момент асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3; $M_{\text{ад.н}}$ – номінальне значення рушійного моменту асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3.

Таким чином на підставі рівнянь (9) і (10) видно, що асинхронний двигун типу 4A132M2Y3 може розвинути достатньо великий рушійний момент, щоб забезпечити рух електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% (20°) на першій передачі. Щоб запобігти перегріву перетворювача частоти (ПЧ) треба, щоб номінальне значення струму обраного ПЧ було більшим значення струму, який АД споживає від ПЧ при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36 % (20°). Тому було обрано перетворювач частоти типу DV6-340-45K з номінальним значенням вихідного струму 90 А. Маса ПЧ типу DV6-340-45K дорівнює 30 кг.

З табл. 3 видно, що при номінальному значенні кутової швидкості валу тягового двигуна електромобіль на 4-й передачі може рухатись зі швидкістю 73,1 км/год. При номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (35,8 Нм) приводні колеса електромобіля на 4-й передачі КПП розвивають силу тяги, яка дорівнює 499,12 Н (табл. 3). З табл. 2 видно, що при русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю 70 км/год сила опору руху електромобіля ($F_{\Sigma \text{оп.}}$) дорівнює 404,76 Н, а при русі електромобіля зі швидкістю 80 км/год сила опору руху електромобіля дорівнює 463,50 Н. Тому можна стверджувати, що при русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю до 80 км/год тяговий АД буде розвивати момент, який не буде перевищувати номінального значення, і тому температура тягового АД також не буде перевищувати номінального значення. Також можна зробити висновок про те, що при частотному регулюванні швидкості АД електромобіль короткочасно може рухатись зі швидкістю, яка перевищує 80 км/год, але для цього на обмотку статора треба подавати напругу змінного струму, частота якої буде перевищувати номінальне значення (50 Гц). При цьому навантаження ПЧ по струму не буде перевищувати номінального значення.

На підставі параметрів АД типу 4A132M2Y3, у якого фази обмотки статора з'єднано трикутником, було визначено параметри тягової АБ. Відповідно до проведених розрахунків номінальне значення напруги тягової літій-залізо-фосфатної АБ електромобіля має дорівнювати 390 В [14]. На підставі результатів розрахунків, наведених в таблиці 2, було визначено, що ємність АБ, яка буде достатньою для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 50 км/год., має дорівнювати 40 А×год. Така АБ може накопичувати 15,6 кВт×год. (56,2 МДж) електричної енергії. Сумарна маса акумуляторів, які входять до складу АБ, дорівнює 80 кг. Маса АБ дорівнює 100 кг.

На підставі того, що повна маса електромобіля не може перевищувати повну масу автомобіля з ДВЗ (1200 кг) було визначено, що в порівнянні з базовим автомобілем корисне навантаження електромобіля зменшиться від 450кг до 370кг.

Моделювання системи регулювання швидкості електромобіля виконано у пакеті Matlab Simulink. Графіки перехідних процесів по швидкості і по силі тяги при розгоні електромобіля на 4-й передачі КПП до максимальної швидкості (73,09 км/год.) показано на рис. 2.

З графіків, показаних на рис. 2, видно, що розгін електромобіля на 4-й передачі КПП до максимальної швидкості (73,09 км/год.) відбувається за 27,51 секунди (графік 2). Привідні колеса ЕТЗ розвивають силу тяги 1180,35 Н (графік 3), а тяговий двигун розвиває рушійний момент 84,75 Нм (графік 5). Тобто при розгоні електромобіля на 4-й передачі момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює ($2,365 M_{EM.H}$).

При русі електромобіля на 4-й передачі КПП з максимальною постійною швидкістю (73,09 км/год.) тяговий двигун розвиває рушійний момент 30,32 Нм (графік 5), який урівноважує силу опору руху електромобіля 422,24 Н (графік 4). Тобто момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює ($0,846 M_{EM.H}$).

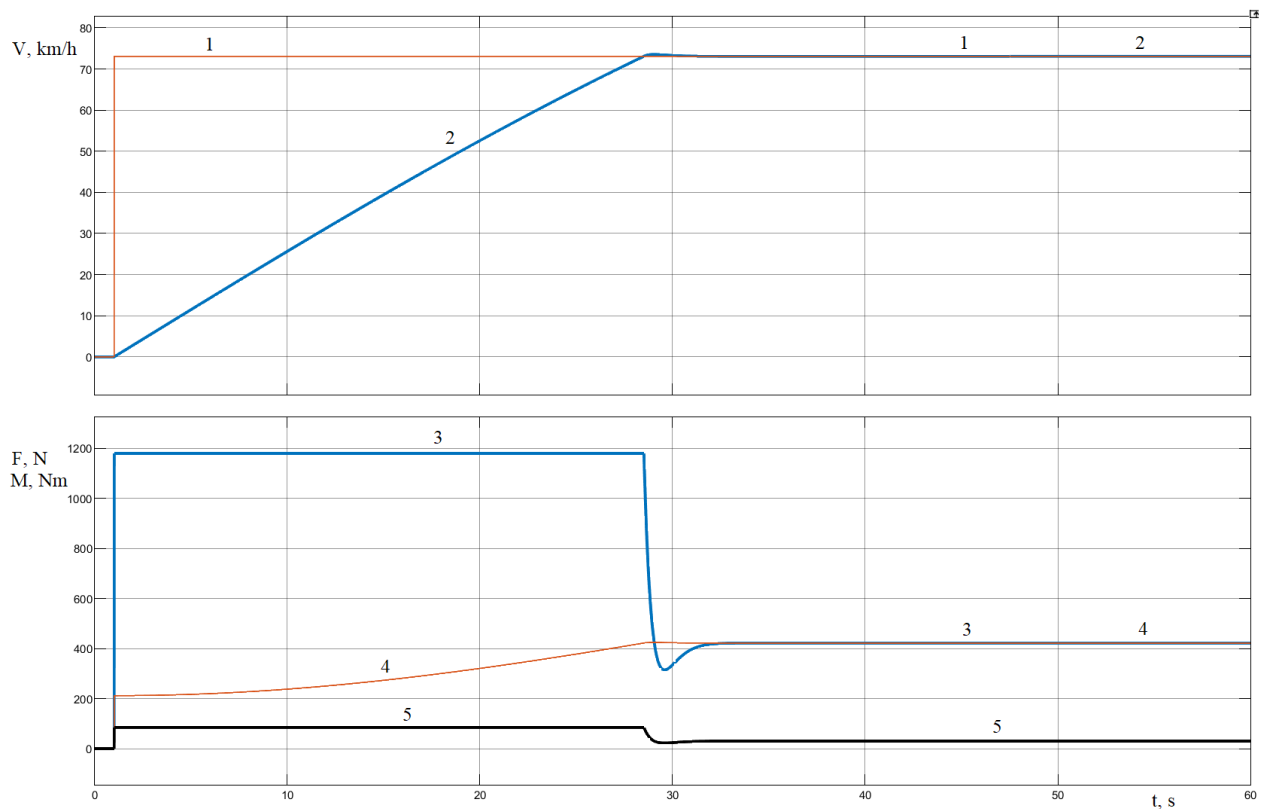


Рис. 2. Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) на 4-й передачі КПП

Основні результати моделювання перехідних процесів по швидкості і по силі тяги приводних коліс ЕТЗ ($F_{\text{тяги}}$) при розгоні електромобіля до максимальної швидкості на одній з чотирьох передач КПП наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Основні параметри руху при розгоні електромобіля на 1-й; 2-й; 3-й та 4-й передачах КПП

№ передачі КПП	Максимальна швидкість ЕТЗ, $V_{\text{макс.}}$, км/год.	Час розгону, $t_{\text{розг.}}$, с	Максимальна сила тяги, $F_{\text{тяги}}$, Н	Максимальний момент АД при розгоні ЕТЗ, $M_{\text{розг.}}$, відн.од.	Момент опору на валу АД при русі ЕТЗ з постійною швидкістю, $M_{\text{ст.}}$, відн.од
1	18,54	1,59	4652,24	$2,365 M_{EM.H}$	$0,115 M_{EM.H}$
2	33,24	4,89	2595,46	$2,365 M_{EM.H}$	$0,233 M_{EM.H}$
3	50,01	11,49	1724,96	$2,365 M_{EM.H}$	$0,426 M_{EM.H}$
4	73,09	27,51	1180,35	$2,365 M_{EM.H}$	$0,846 M_{EM.H}$

На рис. 3 показано графіки перехідних процесів по швидкості електромобіля і по силі тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля, при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля з рекуперацією енергії до накопичувача електричної енергії

відбувається на 4-й передачі. На графіку 2 (рис. 3) видно, що розгін електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням передач КПП відбувається за 17,22 секунди.

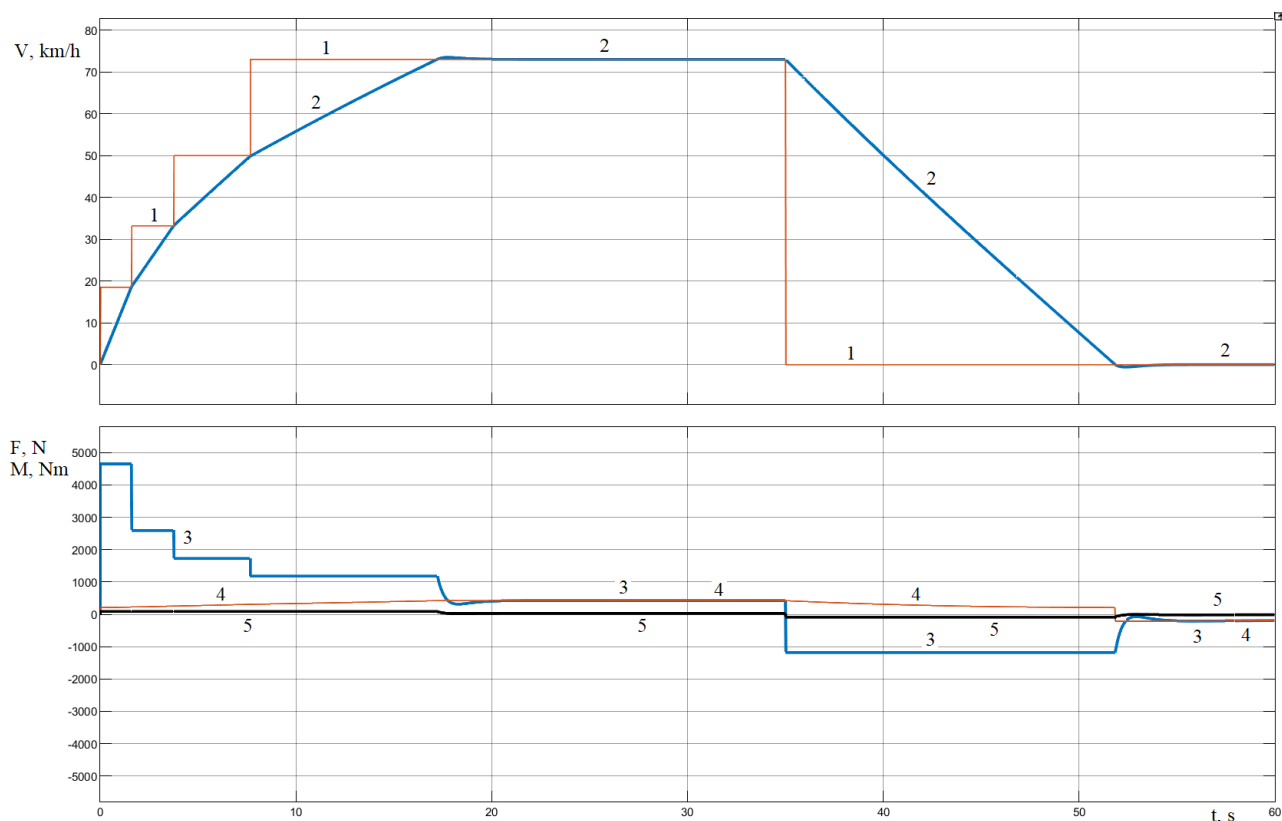


Рис. 3. Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля відбувається на 4-й передачі

При гальмуванні електромобіля на 4-й передачі КПП приводні колеса розвивають силу гальмування (–1180,35 Н) (графік 3), а тяговий двигун розвиває момент гальмування (–84,75 Нм) (графік 5). Гальмування електромобіля відбувається за 16,84 секунди.

На рис. 4 показано графік заданої кутової швидкості обертання валу двигуна (графік 1), графік реальної кутової швидкості валу двигуна (графік 2) при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі (графік 3). Гальмування електромобіля також відбувається на 4-й передачі КПП в результаті зменшення значення сигналу завдання швидкості до нуля (графік 1).

Висновки

1. Для того, щоб забезпечити відповідність основних технічних характеристик електромобіля і базового автомобіля ЗАЗ-968М (з повною масою 1200 кг), призначених для експлуатації в місті, достатньо встановити на електромобіль тяговий АД потужністю 11 кВт (3000 об/хв.), що значно менше потужності ДВЗ (30,8 кВт/при 4400 об/хв.).

2. При використанні КПП автомобіля ЗАЗ-968М при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового АД типу 4A132M2Y3 електромобіль може рухатись на 4-й передачі КПП зі швидкістю 73,1 км/год. (табл. 4).

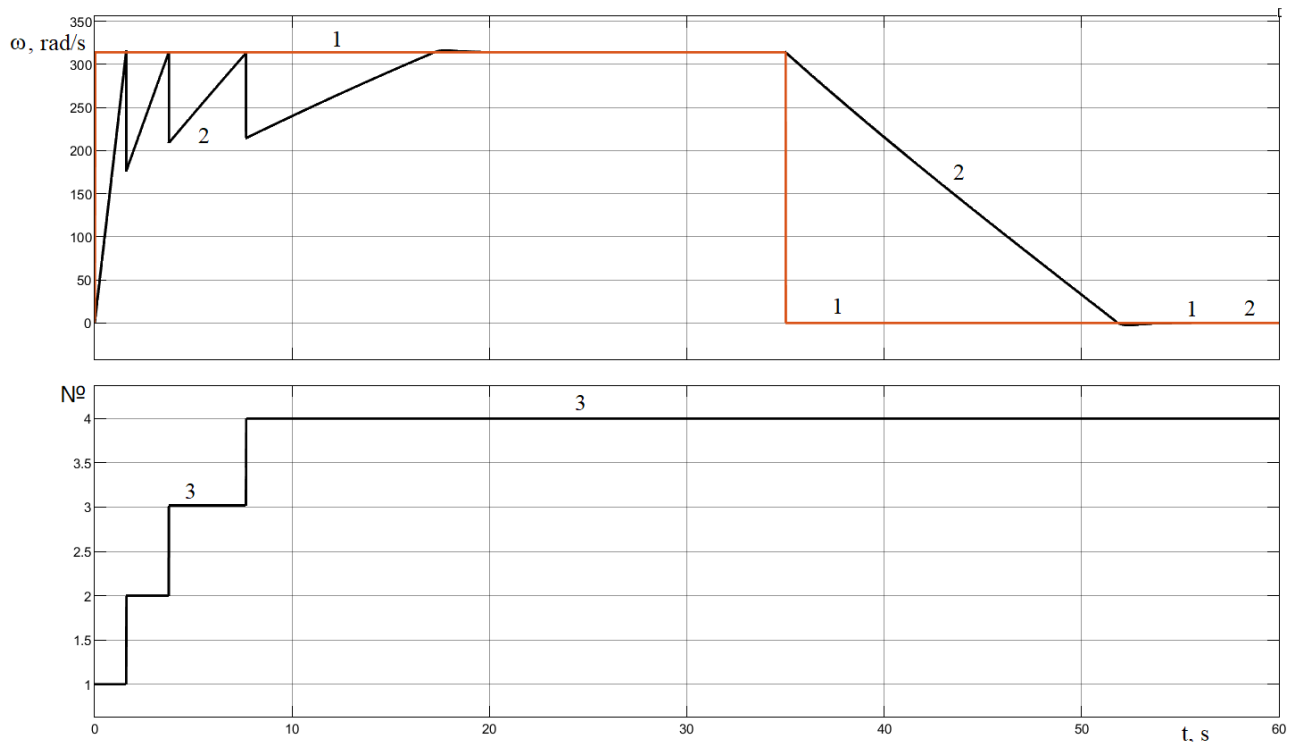


Рис. 4. Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням передач КПП з 1-ї до 4-ї. Гальмування відбувається на 4-й передачі КПП

3. При номінальному значенні рушійного моменту тягового АД приводні колеса електромобіля на 4-й передачі розвивають силу тяги 499,1 Н (табл. 4), що перевищує силу опору руху автомобіля по горизонтальній дорозі зі 80 км/год. (463,5 Н). Тому можна стверджувати, що при тривалому русі електромобіля зі швидкістю до 80 км/год температура тягового АД не буде перевищувати номінального значення температури двигуна (130°C).

4. Електромобіль також короткочасно може рухатись по горизонтальній дорозі зі швидкістю, яка перевищує 80 км/год, але для цього на обмотку статора треба подавати напругу змінного струму, частота якої буде перевищувати номінальне значення частоти напруги АД (50 Гц).

5. Критичне значення крутного моменту тягового двигуна типу 4A132M2Y3 у 2,8 рази перевищує номінальне значення крутного моменту АД. Тому при частотному регулюванні швидкості валу тягового АД типу 4A132M2Y3 електромобіль короткочасно може рухатись вгору по дорозі з уклоном, який перевищує 36 % (20°).

6. Для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 50 км/год. треба мати АБ ємністю 40 А×год., яка має номінальну напругу 390 В і може накопичувати 56,2 МДж (15,6 кВт×год.) електричної енергії. Маса літій-іонної АБ дорівнює 100 кг.

7. В порівнянні з базовим автомобілем з ДВЗ при обмеженні повної маси електромобіля на рівні (1200 кг) його корисне навантаження зменшується від 450 кг до 370 кг.

8. Сумарний об'єм АБ, ПЧ і АД є меншим об'єму моторного відсіку автомобіля ЗАЗ-968М. Тому АБ і ПЧ можна розташувати у моторному відсіку поряд з тяговим АД.

9. При розгоні і гальмуванні електромобіля на будь-якій передачі КПП момент, який розвиває тяговий АД, було штучно обмежено значенням, яке перевищує номінальне значення моменту АД лише в 2,365 рази, що є значно меншим перенавантажувальної здатності АД типу 4A132M2Y3 (2,8 рази).

10. Завдяки застосуванню КПП з чотирма передачами час розгону до максимальної швидкості (73,09 км/год.) зменшився до 17,22 секунди в порівнянні з трансмісією, передавальне число якої відповідає постійно включеній 4-й передачі (27,51 с).

11. При русі електромобіля на 4-й передачі з максимальною сталою швидкістю (73,09 км/год.) яка відповідає номінальній кутовій швидкості вала АД (табл. 4), момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює 84,6% від номінального значення моменту АД. Тому при тривалому русі електромобіля по горизонтальній дорозі з максимальною сталою швидкістю (73,09 км/год.) температура ПЧ і АД не буде перевищувати допустимого значення.

12. При гальмуванні електромобіля на максимальній швидкості (73,09 км/год.) з рекуперацією кінетичної енергії на 4-й передачі КПП кутова швидкість обертання валу двигуна не перевищує 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Час гальмування електромобіля на 4-й передачі КПП дорівнює 16,84 секунди, що може бути занадто великим при терміновому гальмуванні. Тому гальмування з рекуперацією кінетичної енергії на 4-й передачі КПП можна рекомендувати для поступового зменшення швидкості руху електромобіля. Для більш швидкого аварійного гальмування електромобіля треба застосовувати механічні гальма. Але треба звернути увагу на те, що при механічному гальмуванні кінетична енергія електромобіля не буде рекуперована до накопичувача електричної енергії, вона буде втрачена. Це призведе до зменшення максимальної відстані пересування електромобіля на одному заряді АБ. Тому треба максимально використовувати гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії ЕТЗ до накопичувача електричної енергії з повторним використанням її для наступного розгону електромобіля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sierzechula W., Bakker S., Maat K., van Wee B. "The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption". *Energy Policy*. 2014; 68: 183–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043>.
2. Wu G., Inderbitzin A., Bening C. "Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments". *Energy Policy*. 2015; 80: 196–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.004>.
3. Bauer G., Zheng C., Buyers J., Greenblatt J., Shaheen S., Kammen D. "On-Demand automotive fleet electrification can catalyze global transportation decarbonization and smart urban mobility". *Environmental Science & Technology*. 2020; 54: 2103–2111. | DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01609>.
4. Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A. H. "Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles". *Journal of Industrial Ecology*. 2013; 17 (1): 53–64. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.
5. Helmers E., Dietz J., Hartard S. "Electric car life cycle assessment based on real-world mileage and the electric conversion scenario". *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017; 22 (1): 15–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0934-3>.
6. Kryzia D., Kryzia K. "An evaluation of the potential of the conversion of passenger cars powered by conventional fuels into electric vehicles". *Environmental Protection and Natural Resources (EPJ) / (Poland)*. 2023; 26: 171–186. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/171324>.
7. Messagie M., Boureima F. S., Coosemans T., Macharis C., Van Mierlo J. "A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels". *Energies*. 2014; 7 (3): 1467–1482. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7031467>.
8. Stokes L. C., Breetz H. L. "Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy". *Energy Policy*. 2018; 113: 76–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.057>.
9. Hooftman N., Oliveira L., Messagie M., Coosemans T., Van Mierlo J. "Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a Belgian urban setting". *Energies*. 2016;

9: 84. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9020084>.

10. Hoeft F. “Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting: Potential customer's needs, public perception and business model implications”. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2021; 9: 100330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100330>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.73>

UDC 004.94:620.91

Asynchronous traction electric drive for a cheap city passenger vehicle

Volodymyr A. Voytenko¹⁾

PhD Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; voitenko@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57344261700

Volodymyr V. Vodichev¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; vva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 6602754799

Alexander O. Kalinin¹⁾

Senior lecturer of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; kalinin.a.g@op.edu.ua

Volodimir V. Gladchenko¹⁾

Inginer of the Department of Denamics and Mechanical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0220-1509>; gladec@opu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The basic principles for the design and production of a cheap city electric car have been formulated. The technical parameters of the transmission of a cheap city electric car with an internal combustion engine have been analyzed, on the basis of which a cheap city electric car should be manufactured. The requirements for the technical parameters of a cheap city electric car have been formulated. The dependence of the resistance force of an electric car on the speed of the electric car on a horizontal road has been analyzed. The dependence of the value of the power of the mechanical energy that the drive wheels of the electric car should develop on the speed of the electric car has been calculated. The dependence of the amount of mechanical energy consumed by the drive wheels of the electric car on the speed of the electric car on a horizontal road for a distance that meets the requirements for the technical parameters of a cheap city electric car has been determined. Based on the technical parameters of the transmission of the car, the value of the maximum angular speed of rotation of the traction motor shaft at the maximum speed of the car in the highest gear of the gearbox has been determined. Based on the value of the power of mechanical energy that the drive wheels of a complete vehicle should develop when the vehicle moves along a horizontal road at maximum speed, the power of the traction motor is determined. A traction asynchronous electric motor and a frequency converter for it are selected. Based on the technical parameters of the passenger car transmission, the traction force of the drive wheels of the electric vehicle is determined, which corresponds to the nominal value of the mechanical torque of the traction motor on all gears of the gearbox. Also, based on the technical parameters of the passenger car transmission, the speed of the electric vehicle is determined, which corresponds to the nominal value of the angular velocity of the traction motor shaft on all gears of the gearbox. The maximum load moment on the traction motor shaft at the minimum speed of the vehicle in the first gear of the gearbox uphill on a road with a slope of 36% is determined. Based on the maximum load moment on the traction motor shaft, the requirements for the nominal parameters of the frequency converter are determined and a frequency converter for the traction asynchronous electric motor is selected. Based on the nominal parameters of the frequency converter, the requirements for the electrical parameters of the battery of the on-board source of electric energy of an electric vehicle have been formulated. The main technical parameters of the on-board source of electric energy of an electric vehicle have been calculated. The parameters of the traction electric drive of an electric vehicle have been synthesized. A mathematical model of the asynchronous traction electric drive of an electric vehicle has been developed. The mathematical model has been used to study the electromechanical transient processes that occur in the asynchronous traction electric drive of an electric vehicle during acceleration and braking of an electric vehicle.

Keywords: electric vehicle; asynchronous motor; battery; electric energy; mathematical model