

Однозонний тяговий електропривод міського легкового транспортного засобу

В. А. Войтенко, В. А. Водічев, О. Г. Калінін, В. О. Гладченко

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Проведено аналіз технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля з двигуном внутрішнього згорання, який має бути перероблений на міський електромобіль. Сформульовано вимоги до технічних параметрів міського електромобіля. Визначено залежність 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 100 км. Вибрано тяговий асинхронний електричний двигун і перетворювач частоти до нього. Розраховано основні параметри бортового джерела електричної енергії електромобіля. Проведено синтез параметрів тягового електропривода електромобіля. Розроблено математичну модель однозонного тягового електропривода електромобіля. На математичній моделі проведено дослідження електромеханічних перехідних процесів, які відбуваються в однозонному тяговому електроприводі електромобіля при розгоні і при гальмуванні електромобіля.

Ключові слова: електромобіль, асинхронний електричний двигун, електропривод, акумуляторна батарея, електрична енергія, математична модель, перехідні процеси.

Вступ

В Україні і в усьому світі популярність електромобілів постійно зростає. Це обумовлено тим, що вартість пального для двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) постійно зростає і на сьогодні значно перевищує вартість електричної енергії. Тому деякі володарі автомобілів з ДВЗ замислюються над переробкою їх автомобілів на електромобіль, призначений для пересування на невелику відстань [1]–[4]. Проте, до основних проблем, які перешкоджають розповсюдженню електромобілів в Україні можна віднести як велику вартість нових електромобілів, так і велику вартість переробки старих автомобілів з ДВЗ на електромобілі. Одним з можливих способів зменшення вартості нових електромобілів є паралельний серійний випуск електромобілів, побудованих на базі автомобілів з ДВЗ, які вже випускаються серійно [5]. При проведенні переобладнання автомобіля з ДВЗ на електромобіль бажано максимально спростити технологію і зменшити витрати коштів. Тому бажано при побудові електромобіля

використовувати якомога більше елементів і вузлів механічної трансмісії автомобіля з ДВЗ. Найбільш дешевий варіант проектування і виготовлення електромобіля полягає в заміні ДВЗ на електричний двигун і в встановленні перетворювача електричної енергії і акумуляторної батареї (АБ) замість бензобаку. АБ має накопичувати кількість електричної енергії, необхідну для пересування електромобіля на задану відстань. Треба звернути увагу на те, що АБ відноситься до найбільш коштовних і найменш довговічних елементів електромеханічної трансмісії електромобіля. Вага і вартість АБ суттєво залежить від кількості енергії, яка може бути накопичена в АБ. Для зменшення вартості електромобіля бажано використовувати АБ якомога меншої ємності. Тому найбільш дешевим електромобілем може бути електромобіль, призначений для пересування в місті на невелику відстань (від 50 км до 100 км).

Електромобіль буде більш дешевим, якщо на нього встановити найбільш дешевий, але надійний тяговий двигун. До найбільш дешевих, легких і надійних двигунів належать асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненою обмоткою ротора. Тому з метою зменшення вартості електромобіля і підвищення його надійності

© Войтенко В. А., Водічев В. А.,
Калінін О. Г., Гладченко В. О., 2025

бажано в електромобілях застосовувати тягові АД. Для зменшення вартості електромобіля треба використовувати прості і дешеві перетворювачі частоти (ПЧ), які серійно випускає промисловість.

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.

1. Мета дослідження

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

2. Матеріали та результати дослідження

Для переробки автомобіля з ДВЗ на електромобіль було обрано автомобіль ЗАЗ-968М, основні технічні параметри якого приведено в табл. 1 [6]–[8]. На підставі технічних параметрів автомобіля ЗАЗ-968М можна сформулювати вимоги до технічних параметрів електромобіля, побудованого на його базі. Основним принципом при визначенні вимог до технічних параметрів електромобіля є те, що його параметри мають бути не гіршими за параметри автомобіля ЗАЗ-968М. При визначенні вимог до технічних параметрів електромобіля бажано враховувати вимоги законодавства України. Треба звернути увагу на те, що з 1.11.24 в містах України максимальна швидкість пересування ТЗ обмежена на рівні 50 км/год [9]–[10]. Тому з врахуванням припустимого перевищення швидкості (+20 км/год) максимальна швидкість пересування міського електромобіля може бути не більшою 70 км/год.

Для зменшення вартості переробки автомобіля на електромобіль було використано 4-швидкісну коробку перемикання передач (КПП) автомобіля ЗАЗ-968М. В більшості випадків достатньо користуватись 1-ю і 4-ю передачами КПП. Перша передача КПП має забезпечити електромобілю велику силу тяги, потрібну для долаття підйомів дороги (до 36%). Четверта передача КПП має забезпечити достатньо велику максимальну швидкість руху електромобіля по горизонтальній дорозі (60-80 км/год.). Але застосування інших передач КПП дозволяє покращити динамічні властивості ЕТЗ, тобто, збільшити силу тяги (прискорення) приводних коліс електромобіля і, завдяки цьому,

зменшити час розгону і гальмування електромобіля до потрібного значення швидкості руху. Це важливо для більш динамічного пересування електромобіля в місті. До того ж максимальне використання елементів конструкції автомобіля ЗАЗ-968М при розробці електромобіля дозволяє значно зменшити вартість переробки автомобіля на електромобіль. Окрім того, важливо адаптувати органи керування електромобілем так, щоб користуватись ними було звично водію звичайного автомобіля ЗАЗ-968М [11].

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	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
Коробка перемикання передач	4-швидкісна механічна
Передаточні числа на відповідних передачах:	1-перша – 3,800 2-друга – 2,120 3-третья – 1,409 4-четверта – 0,964 Задня – 4,156
Передаточне число головної передачі	4,125
Розмір радіальних шин	155/70 R13

Будемо вважати, що габаритні розміри електромобіля і максимальна повна маса електромобіля дорівнюють габаритним розмірам і повній масі автомобіля ЗАЗ-968М. Тому значення сили опору руху електромобіля визначаємо для габаритних розмірів і повної масі автомобіля ЗАЗ-968М [9], [10], [12].

В табл. 2 неведені результати розрахунку сил опору повітря ($F_{\text{оп.пов}}$) [12] і сумарної сили опору руху ($F_{\Sigma\text{оп}}$) електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю (V).

В табл. 2 також неведено результати розрахунку залежності значення потужності механічної енергії (P_K), яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості

руху електромобіля (V) по горизонтальній дорозі, а також результати розрахунку залежності значення кількості енергії (A_K), яку будуть витратити приводні колеса електромобіля, при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю на відстань 100 км [9].

Таблиця 2

Результати розрахунку сили опору руху, потужності і кількості енергії, яку мають розвивати і витратити приводні колеса при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з потрібною швидкістю

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

Будемо вважати, що при русі електромобіля вгору по дорозі з укладом 36% швидкість руху буде достатньо малою, тому силу опору повітря враховувати не будемо [9]–[10]. Сумарну силу опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з укладом 36% ($F_{\Sigma,36\%}$) визначаємо за формулою (1):

$$F_{\Sigma,36\%} = F_{\text{кот.36\%}} + F_{\text{укл.36\%}} \quad (1)$$

$$F_{\Sigma,36\%} = 199,12 + 4026,26 = 4225,38 \text{ Н.}$$

де $F_{\text{кот.36\%}}$ – сила опору котіння коліс електромобіля по дорозі з укладом 36%;

$F_{\text{укл.36\%}}$ – сила опору руху електромобіля від укладу дороги.

Функціональну схему електромеханічної трансмісії електромобіля показано на рис. 1. Цифрами позначено наступні елементи і вузли трансмісії електромобіля: 1 – бортове джерело електричної енергії; 2 – перетворювач частоти (ПЧ); 3 – тяговий електродвигун; 4 – коробка перемикання передач (КПП); 5 – головна передача з диференціалом (ГП); 6 – півосі приводних коліс; 7 – приводні колеса.

Статичний радіус шини електромобіля визначено на підставі параметрів шини автомобіля ЗАЗ-968М [6]–[8], які наведено в табл. 1:

$$R_{CT} = 0,257 \text{ м.} \quad (2)$$

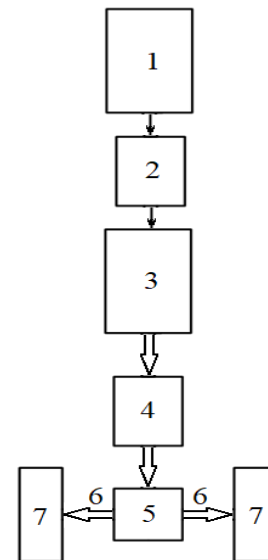


Рисунок 1 – Функціональна схема трансмісії електромобіля

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

$$i_{\text{транс.}i} = i_{\text{КПП.}i} i_{\text{ГП}}, \quad (3)$$

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

$i_{\text{ГП}}$ – передавальне число ГП, від.од..

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

Таблиця 3
Передавальні числа трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $i_{\text{ТРАНС.і}}$
1-перша	15,675
2-друга	8,745
3-третя	5,812
4-четверта	3,977
Задній хід	17,144

На підставі статичного радіусу шини електромобіля (2) і передавальних чисел трансмісії електромобіля (табл.3) визначимо 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) за формулою (4):

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

$$\omega_{\text{АД.4.70}} = \frac{19,44 \times 3,977}{0,257} = 300,83 \text{ рад/с.}$$

де $V_{\text{ЕТЗ.70}} = 19,44$ м/с – максимальна лінійна швидкість руху електромобіля (70 км/год);

$i_{\text{ТРАНС.4}} = 3,977$ – передавальне число електромеханічної трансмісії електромобіля на 4-й передачі КПП (табл. 3).

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною швидкістю (70 км/год) на найвищій 4-й передачі КПП необхідно, щоб вал тягового двигуна обертася з кутовою швидкістю 300,83 рад/с (2872,7 об/хв.). Це треба врахувати при виборі тягового АД для однозонної системи регулювання швидкості.

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). Таким чином, номінальна потужність тягового двигуна має відповідати умові (5): 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;

$\eta_{\text{ТРАНС}} = 0,85$ – ККД механічної трансмісії електромобіля.

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною лінійною 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 300,83 рад/с (2872,7 об/хв.). В зв'язку з цим було обрано тяговий асинхронний двигун типу 4А132М2У3 основного виконання зі ступенем захисту IP44 [13] номінальною потужністю 11 кВт і з номінальним значенням синхронної кутової швидкості обертання валу 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Маса АД типу 4А132М2У3 дорівнює 93 кг.

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

$$V_{\text{ЕТЗ.і}} = \frac{\omega_{\text{АД.Н.0}} \cdot (1 - s_{\text{Н}})}{i_{\text{ТРАНС.і}}} R_{\text{СТ}} \quad (6)$$

де $\omega_{\text{АД.Н.0}} = 314,16$ рад/с – номінальне значення синхронної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна типу 4А132М2У3;

$s_{\text{Н}} = 0,023$ – номінальне ковзання валу тягового АД типу 4А132М2У3;

$i_{\text{ТРАНС.і}}$ – передавальне число механічної трансмісії електромобіля на і-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 радіусу приводних коліс та передавальних чисел трансмісії електромобіля на відповідних передачах КПП (табл. 3). Результати розрахунку наведені в табл. 4.

За формулою (7) було визначено номінальний рушійний момент тягового АД типу 4А132М2У3:

$$M_{\text{АД.Н}} = \frac{P_{\text{2Н}}}{\omega_{\text{АД.Н.0}} \cdot (1 - s_{\text{Н}})} \quad (7)$$

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

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

За допомогою рівняння (8) було визначено силу тяги, яку будуть розвивати приводні колеса електромобіля на кожній передачі КПП ($F_{\text{ЕТЗ,Н,і}}$), якщо вал тягового АД буде розвивати номінальний момент ($M_{\text{АД,Н}} = 35,84 \text{ Нм}$):

$$F_{\text{ЕТЗ,Н,і}} = \eta_{\text{ТРАНС}} \cdot i_{\text{ТРАНС,і}} \frac{M_{\text{АД,Н}}}{R_{\text{СТ}}}, \quad (8)$$

Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку швидкості руху електромобіля і сили тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля на різних передачах КПП при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового АД і номінальному значенні моменту, який розвиває тяговий АД

Номер передачі КПП	$V_{\text{ЕТЗ}}$, м/с	$V_{\text{ЕТЗ}}$, км/год.	$F_{\text{ЕТЗ,Н,і}}$, Н
1-перша	5,032	18,12	1858,1
2-друга	9,020	32,47	1036,6
3-третя	13,572	48,86	688,9
4-четверта	19,835	71,40	471,4
Задній хід	4,601	16,56	2032,2

Порівняємо результати розрахунку значення сили опору руху електромобіля вгору по дорозі з уклоном 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. 4). За формулою (9) визначимо кратність перенавантаження тягового двигуна по моменту при русі повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% на першій передачі КПП з малою швидкістю:

$$\lambda_1 = \frac{F_{\Sigma 36\%}}{F_{\text{ЕТЗ,Н,1}}}, \quad (9)$$

$$\lambda_1 = \frac{4225,38}{1858,1} = 2,27.$$

де $F_{\Sigma 36\%}$ – сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36%;

$F_{\text{ЕТЗ,Н,1}}$ – сила тяги, яку розвивають приводні

колеса електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні моменту тягового АД типу 4A132M2Y3 (табл.4).

Відповідно до параметрів асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3 [13] його перенавантажувальна здатність за моментом дорівнює:

$$\frac{M_{\text{К}}}{M_{\text{АД,Н}}} = 2,8. \quad (10)$$

де $M_{\text{К}}$ – критичний момент асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3;

$M_{\text{АД,Н}}$ – номінальний момент 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% на першій передачі.

Окрім того можна використовувати передачу заднього ходу як додаткову понижену передачу КПП. Для цього достатньо включити за допомогою КПП передачу заднього ходу і змінити напрям обертання валу АД за допомогою ПЧ.

Для запобігання перенавантаження перетворювача частоти (ПЧ) важливо, щоб при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36% тяговий АД не споживав від ПЧ занадто велике значення струму. Тому номінальне значення струму обраного ПЧ має бути більшим значення струму, який АД споживає від ПЧ при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36%. Відповідно було обрано перетворювач частоти типу DV6-340-22K з номінальним значенням вихідного струму 48 А [14]. Маса ПЧ типу DV6-340-22K дорівнює 12 кг.

З табл. 4 видно, що при номінальному значенні кутової швидкості валу тягового двигуна (306,9 рад/с) електромобіль на 4-й передачі може рухатись на швидкості 71,40 км/год. З табл. 4 також видно, що при номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (35,8 Нм) приводні колеса електромобіля на 4-й передачі КПП розвивають силу тяги, яка дорівнює 471,4 Н. 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 тривалому русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі

швидкістю до 80 км/год тяговий АД буде розвивати момент, який не перевищує 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 частоти (50 Гц). Кратність максимального крутного моменту тягового двигуна типу 4A132M2У3 дорівнює 2,8. Тому впродовж короткого часу електромобіль здатен долати дорогу з уклоном 36%.

На підставі параметрів АД типу 4A132M2У3 [13] було визначено параметри тягової АБ [15]. Номінальне значення напруги тягової літій-йонної АБ електромобіля дорівнює 592 В [16]. На підставі результатів розрахунків, наведених в таблиці 2 було визначено, що ємність АБ, яка є достатньою для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 80 км/год, має дорівнювати 30 А×год. Таким чином, розроблена АБ може накопичувати 17,76 кВт×год (64 МДж) електричної енергії. Маса АБ дорівнює 130 кг.

На підставі того обмеження, що повна маса електромобіля не може бути більшою за повну масу автомобіля з ДВЗ (1200 кг) було визначено, що в порівнянні з автомобілем з ДВЗ корисне навантаження електромобіля зменшиться від 450кг до 360кг.

Для синтезу параметрів регулятора швидкості АД треба знати значення сумарного моменту інерції електропривода, приведенного до валу тягового АД. Результати розрахунку значення сумарного моменту інерції електропривода, приведенного до валу тягового АД, для повного електромобіля, який рухається на 1-й, 2-й, 3-й, 4-й передачі КПП і на передачі заднього ходу, приведені в табл. 5.

Таблиця 5
Результати розрахунку значення приведенного до валу тягового двигуна сумарного моменту інерції для повного електромобіля.

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $i_{\text{ТРАНС}}$	$J_{\Sigma ETZ, i}$, кг·м ²
1-перша	15,675	0,3686
2-друга	8,745	1,082
3-третя	5,812	2,392
4-четверта	3,977	5,057
Задній хід	17,144	0,3157

Оскільки приведенне до валу двигуна значення сумарного моменту інерції тягового електропривода змінюється у 16 разів, то синтез параметрів регулятора швидкості електромобіля було виконано для максимального значення сумарного моменту інерції електропривода:

$$J_{\Sigma ETZ, MAX.} = 5,057 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (11)$$

Але треба сказати, що насправді функцію регулятора швидкості виконує водій, який знає задане значення швидкості, з якою має рухатись електромобіль, оцінює значення реальної швидкості руху електромобіля і формує сигнал завдання швидкості електромобіля натискаючи на педаль газу. Сигнал від педалі газу подається на вхід ПЧ і змінює частоту напруги на обмотці статора АД.

Моделювання системи регулювання швидкості електромобіля виконано у пакеті Matlab Simulink [17].

На рис. 3 показано часові діаграми перехідних процесів по швидкості електромобіля і по силі тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля, при розгоні до максимальної швидкості (73,09 км/год.), з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі, й при гальмуванні електромобіля з перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі.

На часовій діаграмі 2 (рис. 3) видно, що розгін електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) з перемиканням передач КПП відбувається за 17,22 секунди.

На рис. 3 також видно, що при розгоні електромобіля на 1-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 4652,24 Н (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває рушійний момент 84,75 Нм (часова діаграма 5). Максимальне значення рушійного моменту обмежено штучно.

При розгоні електромобіля на 2-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 2595,46 Н (часова діаграма 3), а рушійний момент тягового двигуна штучно обмежено максимальним значенням 84,75 Нм.

При розгоні електромобіля на 3-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 1724,96 Н (часова діаграма 3), а рушійний момент тягового двигуна штучно обмежено на максимальному значенні 84,75 Нм.

При розгоні електромобіля на 4-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 1180,35 Н (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення рушійного моменту 84,75 Нм (часова діаграма 5).

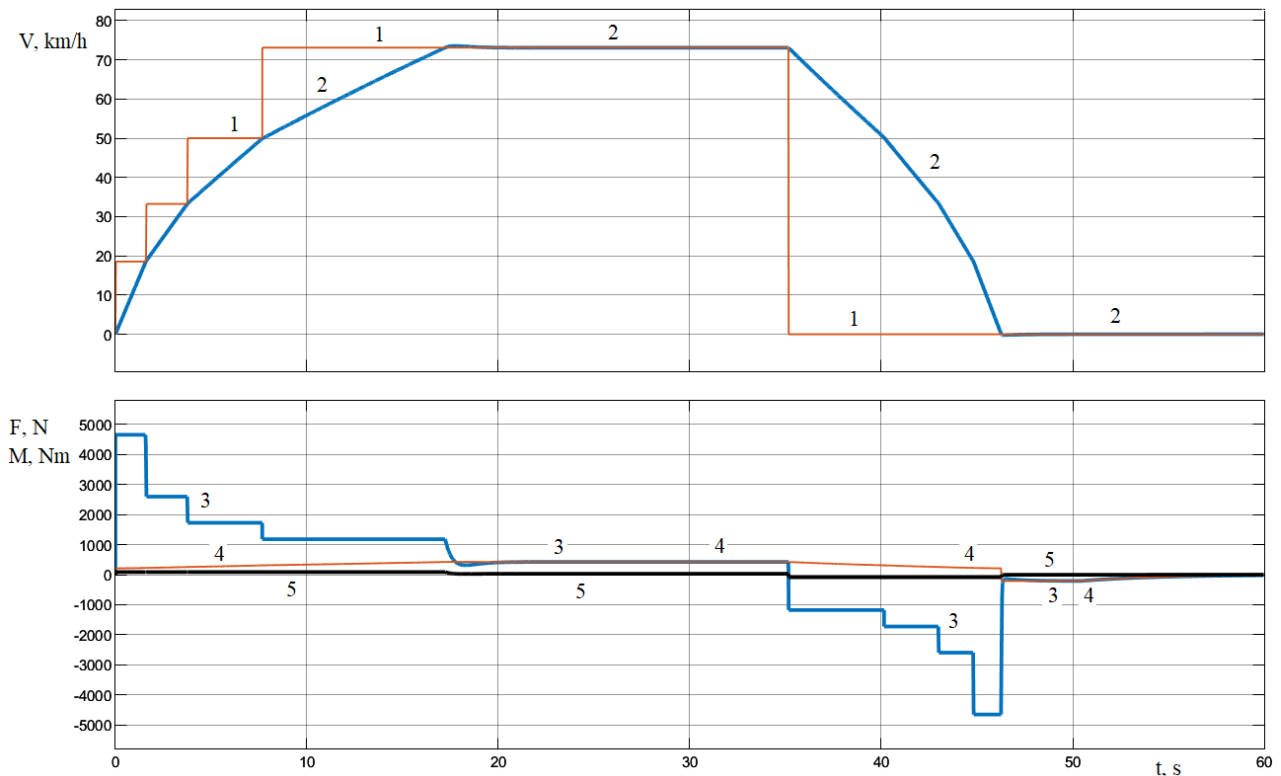


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля також відбувається з перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі

При русі повного електромобіля на 4-й передачі КПП з максимальним постійним сталим значенням швидкості (73,09 км/год.) тяговий двигун розвиває рушійний момент 30,32 Нм (часова діаграма 3), який урівноважує силу опору руху електромобіля 422,24 Н (часова діаграма 4).

Таким чином, при розгоні повного електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі тяговий АД розвиває момент:

$$M_{розг}=2,36 M_{ад.н.}$$

При русі повного електромобіля на 4-й передачі з постійним сталим значенням швидкості (73,09 км/год.) тяговий АД розвиває момент:

$$M_{ст.4}=0,846 M_{ад.н.}$$

Розглянемо один з можливих алгоритмів процесу гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії електромобіля з послідовним перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі.

При гальмуванні спочатку зменшується до нуля значення сигналу завдання швидкості електромобіля і гальмування з рекуперацією

кінетичної енергії електромобіля відбувається на 4-й передачі КПП. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-1180,35 Н) (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення моменту гальмування (-84,75 Нм) (часова діаграма 5), значення якого обмежено штучно.

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 50 км/год відбувається перемикання КПП з 4-ї передачі на 3-ю передачу. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-1725,0 Н) (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення моменту гальмування (-84,75 Нм) (часова діаграма 5), значення якого обмежено штучно.

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 33 км/год відбувається перемикання КПП з 3-ї передачі на 2-у передачу. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-2595,5 Н) (часова діаграма 3), а максимальне значення моменту гальмування тягового двигуна обмежено на рівні (-84,75 Нм) (часова діаграма 5).

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 18,5 км/год відбувається перемикання КПП з 2-ї передачі на

1-у передачу. Приводні колеса розвивають силу гальмування ($-4650,0$ Н) (часова діаграма 3), а максимальне значення моменту гальмування тягового двигуна обмежено на рівні ($-84,75$ Нм) (часова діаграма 5).

Процес гальмування повного електромобіля від максимальної швидкості ($73,09$ км/год.) до повної зупинки (0 км/год.) з використанням перемикачів КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі відбувається за $11,12$ секунди.

На рис. 4 показано часову діаграму заданої кутової швидкості валу двигуна (діаграма 1), часову діаграму реальної кутової швидкості валу двигуна (діаграма 2) при розгоні електромобіля

до максимальної швидкості ($73,09$ км/год) з перемикачів КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі (часова діаграма 3). Гальмування електромобіля також відбувається з перемикачів КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі (часова діаграма 3). Спочатку задане значення швидкості валу АД зменшується до нуля. Починається гальмування електромобіля на 4-й передачі КПП (часова діаграма 2).

При зменшенні швидкості вала АД до $215,6$ рад./с відбувається перемикачів з 4-ї передачі на 3-ю передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 3-й передачі КПП.

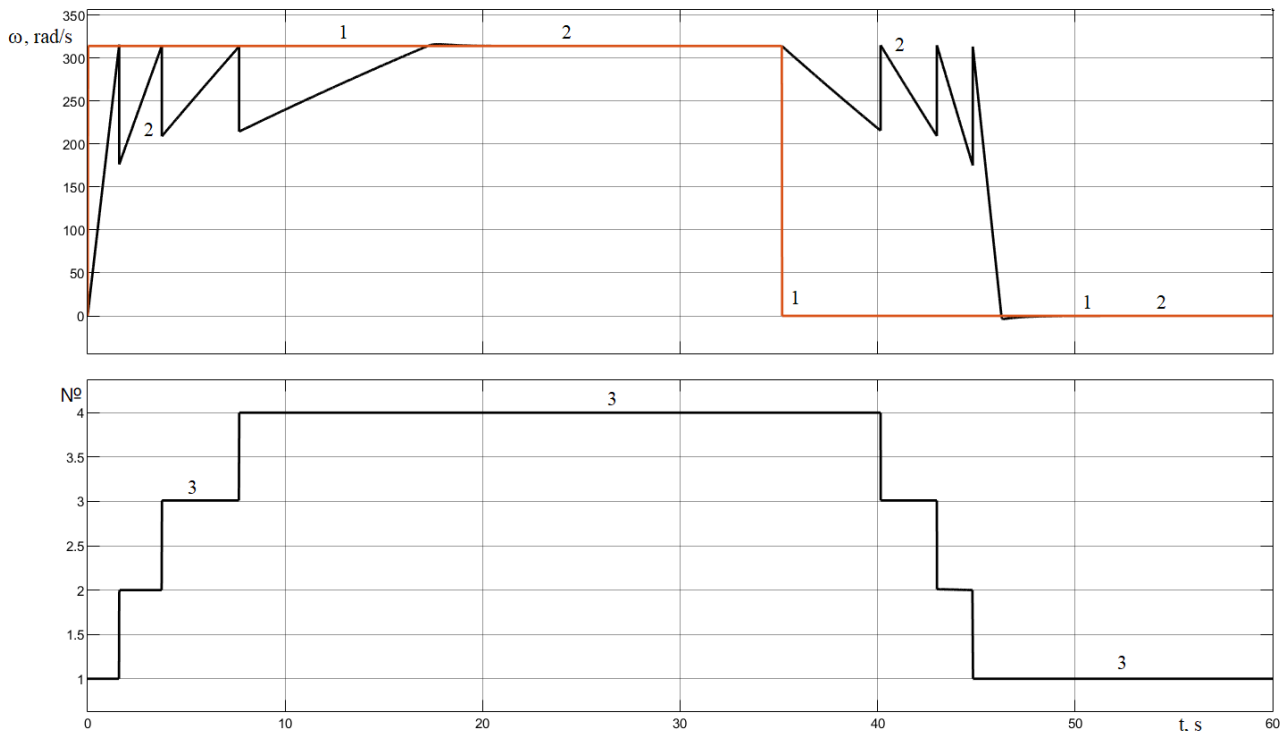


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів при розгоні і гальмуванні електромобіля з послідовним перемикачів передач КПП

При зменшенні швидкості вала АД до $209,4$ рад./с відбувається перемикачів з 3-ї передачі на 2-у передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 2-й передачі КПП.

При зменшенні швидкості вала АД до $175,0$ рад./с відбувається перемикачів з 2-ї передачі на 1-у передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 1-й передачі КПП до повної зупинки електромобіля.

Окрім того, було проведено дослідження електромеханічних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі ЕТЗ під час гальмування електромобіля на максимальному

значенні швидкості ($73,09$ км/год.) тільки на 1-й передачі КПП, або тільки на 4-й передачі КПП.

Гальмування електромобіля при максимальному значенні швидкості ($73,09$ км/год.) тільки на на 4-й передачі КПП відбувається за $16,84$ секунди.

Висновки

1. Для того, щоб забезпечити відповідність основних технічних характеристик електромобіля і автомобіля ЗАЗ-968М (з повною масою 1200 кг), призначених для експлуатації в місті, достатньо встановити на електромобіль тяговий АД потужністю 11 кВт з номінальною синхронною кутовою швидкістю валу 314 рад/с.

2. При використанні КПП автомобіля ЗА3-968М при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД типу 4А132М2У3 (50 Гц) електромобіль може рухатись на 4-й передачі КПП зі швидкістю 73,1 км/год.

3. При русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю 73,1 км/год АД буде розвивати значення рушійного моменту, який не буде перевищувати 85% номінального значення моменту тягового АД. Тому температура тягового АД не буде перевищувати номінального значення температури двигуна типу 4А132М2У3 (130 °С).

4. Критичне значення крутного моменту тягового двигуна типу 4А132М2У3 у 2,8 рази перевищує номінальне значення крутного моменту. Тому при частотному регулюванні швидкості валу тягового АД типу 4А132М2У3 електромобіль короткочасно може рухатись в гору по дорозі з уклоном, який перевищує 36° (20°). Для цього треба вибрати ПЧ з достатньо великим номінальним значенням вихідного струму.

5. В порівнянні з автомобілем з ДВЗ при обмеженні повної маси електромобіля на рівні (1200 кг) його корисне навантаження зменшується від 450 кг до 360 кг. Сумарний об'єм АБ, ПЧ і АД є меншим об'єму моторного відсіку автомобіля ЗА3-968М. Тому АБ і ПЧ можна розташувати у моторному відсіку поряд з тяговим АД.

6. Час гальмування електромобіля на максимальній швидкості руху (73,09 км/год.) з рекуперацією кінетичної енергії 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 використовувати для поступового зменшення швидкості руху електромобіля.

7. Для більш швидкого гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії в порівнянні з гальмуванням електромобіля на 4-й передачі КПП було розглянуто один з варіантів гальмування електромобіля з використанням перемикачів КПП з 4-ї передачі на 1-у передачу. Час гальмування дорівнює 11,12 секунди.

8. 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 АБ, 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 електромобіля до накопичувача електричної енергії з повторним використанням її для наступного розгону електромобіля.

9. Для перемикачів передач КПП під час руху електромобіля необхідно користуватись педаллю зчеплення. Тому такий електромобіль буде мати три педалі: педаль зчеплення, педаль механічного гальма, педаль газу. Педаль газу буде регулювати швидкість руху електромобіля на обраній передачі КПП, при зменшенні зусилля натискання на педаль газу буде зменшуватись швидкість електромобіля з використанням електричного гальмування. Тобто процес керування цим електромобілем буде схожим на процес керування автомобілем з ДВЗ.

Список використаної літератури

1. <http://www.carpoint-e.com.ua/news/perevagi-elektromobiliv/>.
2. . Горова, К. О. Актуальність застосування електромобілів в Україні / К. О. Горова, А. В. Швердіна // Проблеми і перспективи розвитку підприємництва: зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2015. – № 3 (10), т. 1. – С. 105–107.
3. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/items/8e542530-b766-4819-a1c7-34f2381726a6>
4. <https://alecsiss.ru/ekonomichnost-elektromobilej-davajte-poschitaem/>.
5. <https://bioopt.com.ua/ua/a240346-sravnitel'naya-harakteristika-nekotoryh.html>
6. Автомобіль ЗА3-968М «Запорожець». – 2-е вид., перероб. і доп. М : Транспорт, 2008. 352 с.
7. <https://uk.wikipedia.org/wiki/ЗА3-968>.
8. <http://www.autoopt.ru/auto/encyclopedia/car/zaz/mark/zaz-968/>.
9. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник [Електронне видання] Суми : Університетська книга, 2015. 320 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_469.pdf (дата звернення 30.05.2025)
10. Сохацький А. В., Трофімов О. В., Фірсов О. Д. Динаміка автомобільних та інших транспортних засобів. Ч. 1. Тягово-швидкісні властивості автотранспортних засобів. Паливна економічність : навч. посібник. [Електронне видання] Дніпро : Університет митної справи та фінансів, 2018. 56 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_468.pdf (дата звернення 30.05.2025).
11. Пиндус Ю.І., Заверуха Р.Р. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів :

навч. посібник [Електронне видання] Тернопіль : ТНТУ, 2016. 209 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18167/1/EMOA_Lect_FullText.pdf (дата звернення 30.05.2025).

1. Аеродинаміка автомобіля/ під ред. В.Г.Гухо, пер. з нім. М. : Энергопромиздат, 2002. 392 с.
2. <https://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/51839>
3. https://esassets.eaton.com/DOCUMENTATION/AWA_INSTRUCTIONS/19380604.pdf
4. Вершинін Д.В., Водічев В.А., Войтенко В.А., Смотров Е.А.. Особливості вибору параметрів бортового джерела живлення електротранспортного засобу. Електромашинобудування та електрообладнання. К.: Техніка. – 2008. – Вип..71 – с.5-11.
5. https://keepower.ua/catalog/akkumulyatory_1/keepower_imr18650_2500mah_button_top/#tab2
6. Лазарєв Ю. Ф. Довідник з MATLAB : Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. Київ : НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/Lazarev/dovidnyk_Matlab.pdf

References

1. <http://www.carpoin-e.com.ua/news/perevagi-elektromobiliv/>.
2. Horova, K. O. The relevance of the use of electric vehicles in Ukraine / K. O. Horova, A. V. Sheverdina // Problems and prospects of entrepreneurship development: collection of scientific works [Electronic resource] / Kharkiv. National Automobile and Transportation University – Kharkiv, 2015. – No. 3 (10), vol. 1. – pp. 105–107.
3. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/items/8e542530-b766-4819-a1c7-34f2381726a6>
4. <https://alecsiss.ru/ekonomichnost-elektromobilej-davajte-poschitaem/>.
5. <https://bioopt.com.ua/ua/a240346-sravnitelnyaya-harakteristika-nekotoryh.html>
6. Car ZAZ-968M "Zaporozhets". – 2nd ed., revised and supplemented. M: Transport, 2008. 352 p.
7. <https://uk.wikipedia.org/wiki/3A3-968>.
8. <http://www.autoopt.ru/auto/encyclopedia/car/zaz/mark/zaz-968/>.
9. Volkov V. P., Vilsky G. B. Theory of vehicle movement: textbook [Electronic edition] Sumy: University book, 2015. 320 p. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_469.pdf (date of application 30.05.2025)
10. Sokhatsky A. V., Trofimov O. V., Firsov O. D. Dynamics of automobiles and other vehicles. Part 1. Traction and speed properties of motor vehicles. Fuel economy: textbook. [Electronic edition] Dnipro: University of Customs and Finance, 2018. 56 p. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_468.pdf (date of application 30.05.2025).
11. Pyndus Yu.I., Zaverukha R.R. Electronic and microprocessor equipment of automobiles: textbook [Electronic edition] Ternopil: TNTU, 2016. 209 p. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18167/1/EMOA_Lect_FullText.pdf (date of application 30.05.2025).
12. Aerodynamics of a car/ edited by V.G. Guho, translated from German. Moscow: Energopromizdat, 2002. 392 p.
13. <https://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/51839>
14. https://esassets.eaton.com/DOCUMENTATION/AWA_INSTRUCTIONS/19380604.pdf
15. Vershinin D.V., Vodichev V.A., Voitenko V.A., Smotrov E.A.. Features of the selection of parameters of the on-board power source of an electric vehicle. Electrical engineering and electrical equipment. K.: Technika. – 2008. – Issue..71 – p.5-11.
16. https://keepower.ua/catalog/akkumulyatory_1/keepower_imr18650_2500mah_button_top/#tab2
17. Lazarev Yu. F. MATLAB Handbook: Electronic textbook for course and diploma design. Kyiv: NTUU "KPI", 2013. – 132 p. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/Lazarev/dovidnyk_Matlab.pdf

Single-Band Traction Electric Drive of a City Light Vehicle

V. Voitenko, V. Vodichev, O. Kalinin, V. Gladchenko

Odesa National Polytechnic University

Abstract. *The analysis of the technical parameters of the transmission of a passenger car with an engine, which is to be converted into an electric vehicle, was carried out. The requirements for the technical parameters of the electric vehicle were formulated. The dependence of the resistance force of the electric vehicle on the speed of the electric vehicle on a horizontal road was determined, the dependence of the value of the power of the mechanical energy that the drive wheels of the electric vehicle should develop on the*

speed of the electric vehicle was calculated, the dependence of the amount of mechanical energy consumed by the drive wheels of the electric vehicle on the speed of the electric vehicle on a horizontal road for a distance of 100 km was determined. A traction induction motor and a frequency converter for it were selected. The main 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 a single-zone traction electric drive of an electric vehicle has been developed. The mathematical model has been used to study electromechanical transient processes that occur in a single-zone traction electric drive of an electric vehicle during acceleration and braking of an electric vehicle.

Keywords: *electric vehicle, induction motor, electric drive, accumulator battery, electric energy, mathematical model, transient processes.*

Отримано 20.08.2025



Войтенко Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: voitenko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 8467

Volodymyr Voytenko, Ph.D, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: voitenko@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8467

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-6913>



Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: vva@eei.opu.ua, тел. +38 050 234 7722

Volodymyr Vodichev, Dr. of Science, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: vva@eei.opu.ua, ph.: +38 050 234 7722,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-1149>



Калінін Олександр Георгійович, старший викладач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: agk@opu.ua, тел. +38 050 392 1298

Alexander Kalinin, senior lecturer of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: agk@opu.ua, ph.: +38 050 392 1298

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2654-9969>



Гладченко Володимир Олександрович, інженер кафедри динаміки і механічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: gladec@opu.ua, тел. +38 096 414 2049

Volodymyr Gladchenko, inginer Department of Denamics and Mechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: gladec@opu.ua; ph.: +38 096 414 2049

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0220-1509>