

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І СИСТЕМ
УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРОПРИВОД З АВТОНОМНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ»

ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

КРЕМЕНЧУК 2019

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Електропривод з автономними джерелами живлення» для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Укладачі: к. т. н., доц. А. П. Калінов,
к. т. н., доц. В. О. Мельников
ст. викладач О. А. Хребтова

Рецензент к. т. н., доц. Ю. В. Зачепа

Кафедра систем автоматичного управління та електропривода

Затверджено методичною радою КрНУ імені Михайла Остроградського

Протокол “ ____ ” від “ ____ ” _____ 2019 р.

Голова методичної ради _____ проф. В.В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Зміст дисципліни	6
2 Рекомендації щодо виконання та оформлення контрольної роботи	8
3 Варіанти завдань контрольної роботи.....	9
4 Приклад виконання практичної частини завдання	16
5 Критерії оцінювання знань студентів	19
Список літератури	20
Додаток А Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи.....	21

ВСТУП

Дисципліна “Електропривод з автономними джерелами живлення” лежить в основі дисциплін, що вивчають прикладні питання побудови, проектування та функціонування систем автоматизованого електроприводу на базі автономних джерел живлення, побудованих з використанням сучасної елементної бази. Метою виконання контрольної роботи є оволодіння студентами теоретичними основами синтезу та проектування, практичними навиками експлуатації сучасних систем автоматизованого електропривода при живленні від автономних джерел.

Сучасний етап розвитку електротехніки сприяв до розробки та використання в різних галузях людської діяльності електротранспорту. В даний час розрізняють наступні транспортні галузі: залізничний, автомобільний, морський, авіаційний, річковий, трубопровідний транспорт. Різні види електричного транспорту значною мірою позбавлені недоліків, притаманних транспорту з тепловими двигунами. Отримуючи живлення від електричних джерел, транспорт перетворює електричну енергію в механічну, що використовується для переміщення вантажів і пасажирів. Електромеханічні трансмісії набули широкого розповсюдження у транспортних засобах завдяки простоті передачі, перетворення та керування електричною енергією. При цьому електричні двигуни не викидають в повітря жодних забруднюючих речовин у газоподібному або рідкому вигляді. Тому електропривод з автономними джерелами живлення має широку сферу застосування.

Метою виконання контрольної роботи є закріплення студентами теоретичних знань та придбання практичних навичок розрахунку характеристик тягових електроприводів.

Унаслідок проведення контрольної роботи студенти повинні вміти розраховувати необхідні параметри електроприводів; розраховувати статичні, динамічні та енергетичні характеристики електродвигунів постійного та змінного струму; здійснювати вибір елементів силових та керуючих кіл електроприводів при живленні від автономних джерел.

1 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1 Вступ. Загальні поняття та положення курсу

Предмет, задачі, зміст курсу, зв'язок з іншими дисциплінами спеціальності. Призначення, структура та основні елементи електропривода. Особливості умов роботи електропривода з автономними джерелами живлення. Класифікація електроприводів. Класифікація автономних джерел живлення.

Література: [1, с. 25–42; 2, с. 13–32].

Тема 2 Джерела енергії електропривода

Характеристика енергетичних показників акумуляторних батарей. Характеристика енергетичних показників електромеханічних накопичувачів. Характеристика енергетичних показників двигун-генераторних установок. Характеристика енергетичних показників комбінованих енергоустановок.

Література: [1, с. 31–39; 3, с. 38–62].

Тема 3 Тягові та гальмівні характеристики електроприводів з автономними джерелами живлення

Вимоги до тягових характеристик електродвигунів. Обмеження тягових характеристик. Умови роботи кінематичних ланок системи електропривода для забезпечення необхідних показників якості роботи. Регулювання сили тяги електроприводів. Обмеження гальмівних характеристик.

Література: [1, с. 146–151; 4, с. 47–56].

Тема 4 Способи регулювання електроприводів з автономними джерелами живлення

Реостатне регулювання частоти обертання електроприводів. Тиристорне та імпульсне регулювання напруги живлення тягових електроприводів постійного струму. Частотне регулювання електроприводів змінного струму. Характеристики частотного регулювання. Електроприводи з вентильно-індукторними двигунами.

Література: [1, с. 73–89; 5, с. 89–120].

Тема 5 Гальмування тягових електроприводів з автономними джерелами живлення

Класифікація систем гальмування. Характеристики двигунів при рекуперативному, реостатному та рекуперативно-реостатному гальмуваннях. Електричне гальмування за допомогою тиристорно-імпульсних перетворювачів. Вимоги до гальмівних характеристик електродвигунів.

Література: [5, с. 121–155; 6, с. 619–631; 7, с. 78–93].

Тема 6 Основні структури електромеханічних передач тягового привода

Послідовна, паралельна та послідовно-паралельна структура електромеханічних трансмісій. Переваги, недоліки та сфери застосування. Енергетичні діаграми роботи трансмісій у пускових, рушійних та гальмівних режимах. Електромеханічні трансмісії з буферними накопичувачами енергії. Робота теплового двигуна з максимальним коефіцієнтом корисної дії.

Література: [3, 8–12; 8, с. 16–24].

Тема 7 Функціональні елементи систем автоматизованого керування (САК) технологічних об'єктів (ТО).

Задають, проміжні, датчики, об'єкти регулювання, виконавчі і керуючі елементи. Принципи регулювання, що застосовуються в САК ТО. Типові функціональні схеми САК ТО. Функціональні схеми САК, що застосовуються на вітчизняних ТО.

Література: [8, с. 26–35; 9, с. 39–53, 175–185].

Тема 8 Призначення і області застосування системи автоведення.

Принципи оптимального управління ТО. Алгоритми і програми автоматичного управління ТО. Точність руху поїздів при автоведення. Автономні системи автоведення електропоїздів, пасажирських і вантажних поїздів. Системи телемеханічного управління ТО.

Література: [8, с. 36–62; 9, с. 54–92].

2 РЕКОМЕНДАЦІ ЩОДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота з дисципліни містить теоретичне питання, а також практичну частину, яка складається з однієї задачі.

Виконання контрольної роботи є підсумковим завданням для закріплення пройденого курсу.

Номер варіанта визначають за двома останніми цифрами номера залікової книжки за таким правилом:

номери 01–22, 23–45, 46–68, 69–91, 92–100 – варіанти 1–22.

Теоритичне питання наведено у додатку А табл. А.1

Робота повинна бути оформлена на стандартних аркушах форматом А4.

Виконуючи набір тексту роботи на комп'ютері, дотримуються таких вимог:

- основний шрифт тексту Times New Roman, 14 pt;
- заголовки – великими літерами напівжирного шрифту;
- властивості абзацу: інтервал полуторний, відступ від краю тексту 1,25 см;
- підкреслювання та виділення **жирним** шрифтом **НЕ**

ВИКОРИСТОВУЮТЬ;

– для відділення тексту програми від основного тесту використовують форматування – *курсив*.

Кожний розділ пояснювальної записки повинен починатися з нової сторінки. Зразок оформлення титульної сторінки контрольної роботи подано у додатку А.

Зміст контрольної роботи:

1. Титульна сторінка.
2. Коротко викладені теоретичного питання за варіантом.
3. Практична частина повинна містити пояснення до послідовності розрахунку та пояснення щодо формул за якими виконується розрахунок. Графічне зображення отриманих результатів можна виконувати як математичному редакторі та і в графічному редакторі.

3 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Варіант 1

Теоретична частина:

1. Енергетичні діаграми роботи трансмісії у пускових, рушійних та гальмівних режимах.

2. Практична частина: Розрахунок основних параметрів електромобіля.

Згідно з варіантом завдання (додаток А, табл. А.2) для прототипу електромобіля необхідно:

- розрахувати потужність електродвигуна;
- за розрахованими даними обрати електродвигун (додаток А, табл. А.3);
- провести розрахунки статичних характеристик електродвигуна;
- провести розрахунки динамічних характеристик електромобіля;
- провести розрахунки енергетичних характеристик електромобіля.

Для кожного режиму побудувати відповідні характеристики.

4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗАВДАННЯ

Завдання. Розрахунок основних параметрів електромобіля.

Для прототипу електромобіля розрахувати необхідну потужність електродвигуна. Провести розрахунки статичних, динамічних та енергетичних характеристик автомобіля. Вихідні параметри для розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні параметри прототипу електромобіля

Величина	Позначення	Значення	Розмірність
Ширина	B	1495	мм
Висота	H	1485	мм
Маса автомобіля	m_0	826	кг
Допустима повна маса автомобіля	m	1230	кг
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_x	0,37	–
Максимальна швидкість електромобіля	V_{\max}	70	км/год
Кут підйому дорожнього полотна	α	15	град

1. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна.

Потужність електродвигуна визначається за виразом:

$$P = \frac{F_{\Sigma} \cdot V_{\max}}{\eta_t \cdot K_p},$$

де F_{Σ} – сумарна сила, що діє на електромобіль під час руху; V_{\max} – максимальна швидкість електромобіля (м/с); η_t – коефіцієнт корисної дії трансмісії ($\eta_t = 0.92$); K_p – коефіцієнт корекції потужності ($K_p = 0.93$).

1.1 Розрахунок сил, що діють на електромобіль під час руху.

Сила тяжіння автомобіля. Сила тяжіння обумовлена масою автомобіля. Вектор сили тяжіння G_a прикладений в центрі мас автомобіля і збігається за напрямком з вектором g .

Сила тяжіння автомобіля визначається за виразом:

$$G_a = m \cdot g ,$$

де m – маса автомобіля; g – прискорення вільного падіння ($g = 9.81$).

$$G_a = 1230 \cdot 9.81 = 12066.3 \text{ Н.}$$

Сила опору підйому. Сила опору підйому, виникає при русі електромобіля під ухил і є складовою сили тяжіння електромобіля спрямованої паралельно дорозі.

Сила опору підйому електромобіля визначається за виразом:

$$F_d = G_a \sin(\alpha) ,$$

де α – кут підйому дорожнього полотна.

Сила опору коченню при русі автомобіля під ухил може бути визначена за виразом:

$$F_k = f_k \cdot G_a \cos(\alpha) ,$$

де f_k – коефіцієнт опору коченню.

Коефіцієнт опору коченню визначається за виразом:

$$f_k = f_0 (1 + A_f \cdot V_{\max}^2) ,$$

де f_0 – коефіцієнт опору коченню деформованого колеса по недеформованій поверхні при малих швидкостях (визначається за таблицею 2); A_f – Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості на опір коченню еластичного колеса по недеформованій поверхні (для легкових автомобілів $A_f = 5.5 \cdot 10^{-4}$ м/с).

Таблиця 2 – Коефіцієнт опору коченню еластичного колеса

Середній діапазон	Стан дороги	Обмерзла дорога	Гравій укочений	Укочена ґрунтова дорога
Від	0.015	0.015	0.020	0.050
До	0.030	0.020	0.025	0.150

Коефіцієнт опору коченню:

$$f_k = 0.02(1 + 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot 19.44^2) = 0.024 .$$

Сила опору коченню при русі автомобіля під ухил діє одночасно з силою опору підйому і складає з нею загальну силу опору дороги, що визначається за виразом:

$$F_{dk} = G_a (f_k \cos(\alpha) + \sin(\alpha)).$$

Задавши максимальний кут підйому дорожнього полотна ($\alpha = 15^\circ$) визначається загальна сила опору дороги:

$$F_{ik} = 12066.3 \cdot (0.024 \cdot \cos(15^\circ) + \sin(15^\circ)) = 3404.56 \text{ Н.}$$

Аеродинамічний опір. При русі автомобіля повітряне середовище впливає на його корпус, створюючи відповідний опір руху. Сила опору повітря визначається виразом:

$$F_{\hat{a}} = 0.5 \cdot C_x \cdot \rho_b \cdot A \cdot V_{\max}^2,$$

де ρ_b – щільність повітря (1,202..1,225); A – площа міделевого перетину автомобіля (площа поздовжньої проєкції електромобіля на вертикальний екран, м^2).

Площа міделевого перетину електромобіля визначається за виразом:

$$A = 0.9 \cdot B \cdot H,$$

де B – ширина профілю електромобіля, м; H – висота профілю електромобіля, м.

$$A = 0.9 \cdot 1.495 \cdot 1.485 = 1.998.$$

Підставляючи всі складові визначається сила опору повітря при максимальній швидкості руху електромобіля:

$$F_{\hat{a}} = 0.5 \cdot 0.37 \cdot 1.202 \cdot 1.998 \cdot 19.44^2 = 167.988, \text{ Н.}$$

1.2 Розрахунок потужності електродвигуна

Потужність двигуна при максимальній швидкості електромобіля визначається за виразом:

$$P_e = \frac{V_{\max} (G_a f_k + F_{\hat{a}})}{\eta_t \cdot K_p \cdot 10^3} = \frac{19.44 \cdot (12066.3 \cdot 0.024)}{0.92 \cdot 0.93 \cdot 10^3} = 10.44 \text{ кВт.}$$

Потужність двигуна при максимальній швидкості електромобіля з урахуванням руху електромобіля під ухил визначається за виразом:

$$P_{e\Psi} = \frac{V_{\max}(G_a f_k + F_{\hat{a}}) + F_{nk}}{\eta_t \cdot K_p \cdot 10^3} = \frac{19.44 \cdot (12066.3 \cdot 0.024) + 3404.56}{0.92 \cdot 0.93 \cdot 10^3} = 14.422 \text{ кВт.}$$

Розраховуються характеристики зміни потужності електродвигуна в залежності від швидкості руху (таблиця 3).

Таблиця 3 – Розрахункові дані

V , км/год	10	20	30	40	50	60	70
$F_{\hat{a}}$, Н	3.428	13.713	30.855	54.853	85.708	123.42	167.988
P_e , кВт	0.958	1.982	3.14	4.498	6.123	8.083	10.443
$P_{e\Psi}$, кВт	4.937	5.961	7.119	8.477	10.102	12.062	14.422

За розрахованими даними будуються відповідні характеристики.

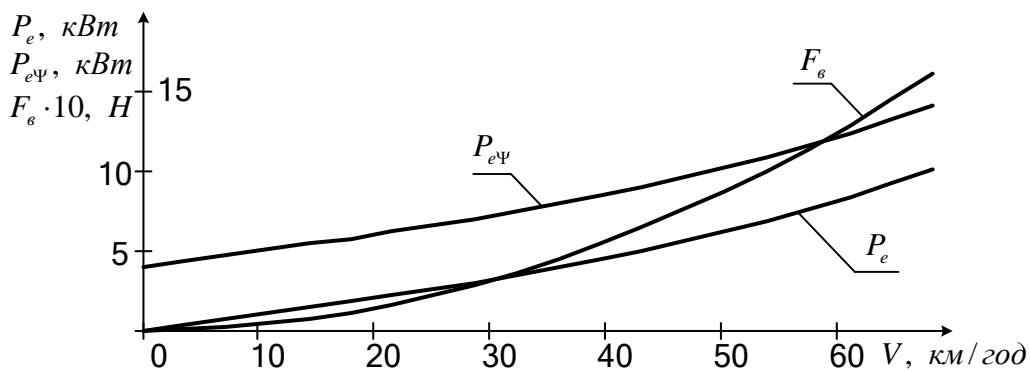


Рисунок 1 – Залежності необхідної потужності електродвигуна та сили опору повітря від швидкості руху електромобіля

Величина тривалої потужності електромобіля розраховується за виразом:

$$P_d = P_{e\Psi} \cdot k.$$

Для міської їзди коефіцієнт k приймається рівним 1.1, тоді потужність двигуна електромобіля буде дорівнювати:

$$P_d = 14.422 \cdot 1.1 = 15.864 \text{ кВт.}$$

За розрахованою потужністю обирається тип електричної машини. Параметри двигуна постійного струму послідовного збудження наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Параметри електродвигуна

Тип	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/хв	n_{\max} , об/хв	η
ДРТ-23,5	16	130	152	600	2500	0,81

1.3 Розрахунок природних характеристик електродвигуна

Кутова частота обертання двигуна визначається за виразом:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}.$$

Тоді

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3.14 \cdot 600}{30} = 62.832 \text{ рад/с.}$$

$$\omega_{\max} = \frac{\pi \cdot n_{\max}}{30} = \frac{3.14 \cdot 2500}{30} = 261.799 \text{ рад/с.}$$

Момент електродвигуна визначається за виразом:

$$M = \frac{P}{\omega},$$

тоді

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{16 \cdot 10^3}{62.832} = 254.648 \text{ Нм.}$$

Активний опір якірного кола може бути визначений:

$$R_{\Sigma} = \alpha \cdot \left(\frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right),$$

де $\alpha = 0.75$ – для двигунів постійного струму послідовного збудження.

$$R_{\Sigma} = 0.75 \cdot \left(\frac{130}{152} \cdot \frac{1 - 0.81}{0.81} \right) = 0.466 \text{ Ом.}$$

Використовуючи універсальну характеристику $\nu = f(i)$ та $\mu = f(i)$ (рис. 2), розраховують природну електромеханічну характеристику двигуна постійного струму послідовного збудження (таблиця 5).

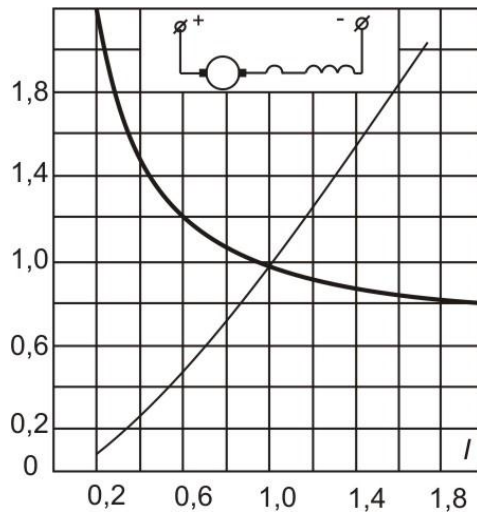


Рисунок 2 – Універсальна характеристика ДПТ ПЗ

Таблиця 5 – Природна характеристика ДПТ ПЗ

i	–	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4
v	–	2	1,6	1,23	1,09	1	0,94	0,89	0,85	0,81	0,78	0,75	0,73
μ	–	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,55	2,85	3,15
$I_{\dot{y}}$	А	30	61	91	122	152	182	213	243	274	304	334	364
ω	рад/с	126	100	77	68	63	60	56	53	51	49	47	46
M	Нм	25	64	127	191	255	331	407	484	560	649	726	802

На основі даних, приведених у таблиці 5, будують природну характеристику $\omega = f(I)$ та $M = f(I)$ двигуна (рис. 3).

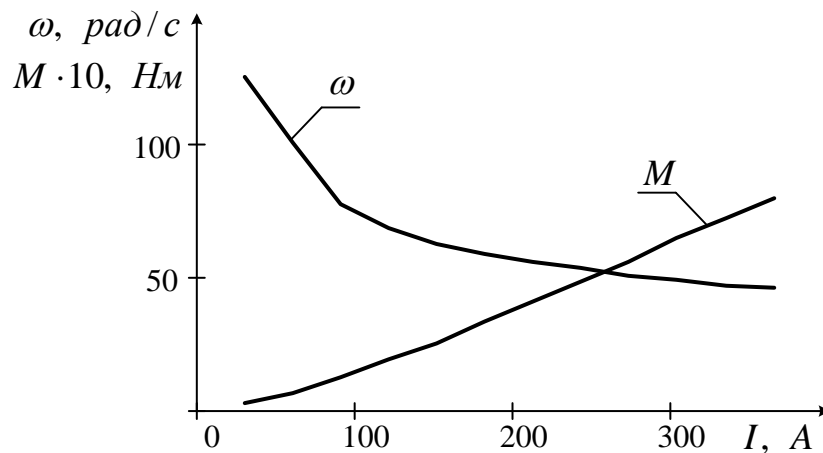


Рисунок 3 – Природна характеристика двигуна

2. Розрахунок та побудова динамічних характеристик електромобіля

2.1 Побудова зовнішньої швидкісної характеристики двигуна

У загальному випадку частота обертання електродвигуна при максимальній швидкості руху автомобіля не дорівнює частоті обертання, що відповідає максимальній потужності двигуна, а, отже, потужність двигуна при максимальній швидкості не дорівнює максимальній потужності.

Для побудови характеристик двигуна $P_e = f(\omega)$ та $M_e = f(\omega)$ використовують залежність Лейдермана:

$$P_{ei} = P_d \cdot \left[A_1 \cdot \left(\frac{\omega_{ei}}{\omega_{e\max}} \right) + A_2 \cdot \left(\frac{\omega_{ei}}{\omega_{\dot{a}\max}} \right)^2 - \left(\frac{\omega_{ei}}{\omega_{e\max}} \right)^3 \right],$$

де ω_{ei} – поточне значення кутової швидкості електродвигуна; $\omega_{e\max}$ – максимальне значення кутової швидкості електродвигуна; $A_1 = A_2 = 1$ – коефіцієнти Лейдермана.

Поточне значення електромагнітного моменту розраховується за виразом:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_e}.$$

Задавши значеннями поточної швидкості розраховується значення потужності та моменту електродвигуна (таблиця 6). За розрахунковими даним будуються відповідні характеристики (рис. 4).

Таблиця 6 – Розрахункові дані потужності та моменту двигуна

ω , рад/с	20	50	80	110	140	170	200	230	260
P_e , кВт	1.3	3.5	5.9	8.3	10.6	12.6	14.3	15.4	15.9
M_e , Нм	64.9	67	73.5	75.4	75.7	74.4	71.5	67.1	61.1

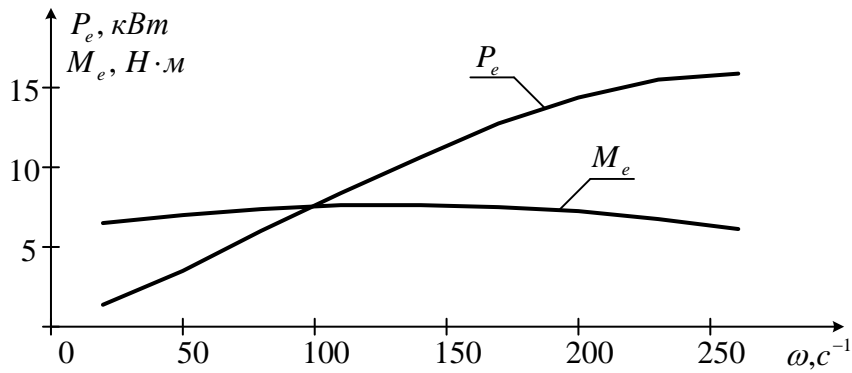


Рисунок 4 – Зовнішня характеристика двигуна

Для визначення робочих характеристик електродвигуна, на різних швидкостях руху, задамося декількома значеннями електромагнітного моменту. Використовуючи універсальну характеристику (рис. 2), розраховують електромеханічну характеристику двигуна (таблиця 5). На основі розрахованих даних будуються відповідні характеристики (рис. 5).

Таблиця 7 – Розрахункові дані електромагнітного моменту ДПС ПЗ

$M_n \cdot \mu$, Нм	25	64	127,4	191	255	331	407	484	560	649	726
$M_{max} \cdot \mu$, Нм	8	19	38	57	76	99	122	145	168	194	217
$M_1 \cdot \mu$, Нм	53	133	267	400	533	693	853	$1.1 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$
$M_2 \cdot \mu$, Нм	18	44	89	133	178	231	284	338	391	453	507
$M_3 \cdot \mu$, Нм	12	31	62	92	123	160	197	234	271	314	351

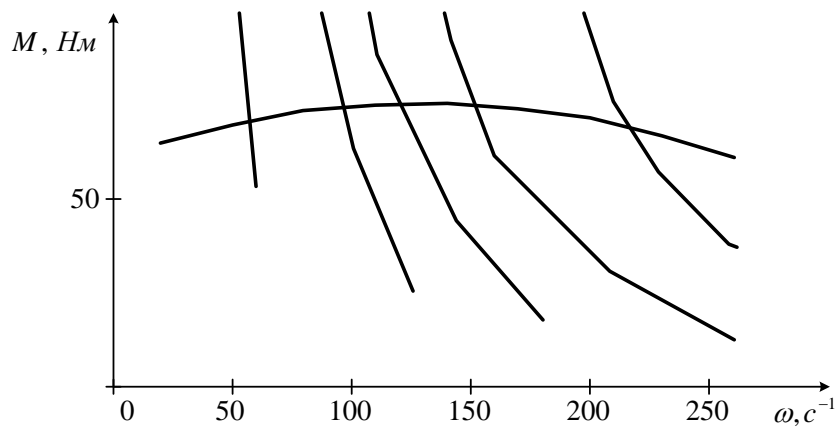


Рисунок 5 – Побудова робочих характеристик електродвигуна

2.2 Розрахунок та побудова тягової характеристики електромобіля

Розрахунок тягової сили електромобіля (F_E) в залежності від швидкості руху (ν) проводиться на основі виразів:

$$F_K = \frac{M_e \cdot u_0}{r_k} \cdot \eta_t;$$
$$\nu = \frac{\omega_e \cdot r_k}{u_0},$$

де u_0 – передавальне число головної передачі; r_k – динамічний радіус колеса, м.

Для визначення передавального числа проєктованого автомобіля скористаємося залежністю:

$$V_{\max} = \frac{\omega_{\max} \cdot r_k}{u_{E\dot{D}} \cdot u_0}$$

де $u_{K\Pi}$ – передавальне число коробки передач. Для випадку руху автомобіля з максимальною швидкістю ($u_{E\dot{I}} = 1$) можна записати:

$$V_{\max} = \frac{\omega_{\max} \cdot r_k}{u_0},$$

тоді:

$$u_0 = \frac{\omega_{\max} \cdot r_k}{V_{\max}}.$$
$$u_0 = \frac{261.799 \cdot 0.287}{19.44} = 3.864.$$

На основі представлених рівнянь розраховується тягова сила автомобіля в залежності від швидкості руху (таблиця 8). Та будується відповідна характеристика (рис. 6).

Таблиця 8 – Розрахункові дані тягової сили електромобіля

ω , рад/с	20	50	80	110	140	170	200	230	260
ν , км/год	5.3	13.4	21.4	29.4	37.4	45.5	53.5	61.5	69.5
F_E , Н	730	788	827	849	852	838	805	755	687

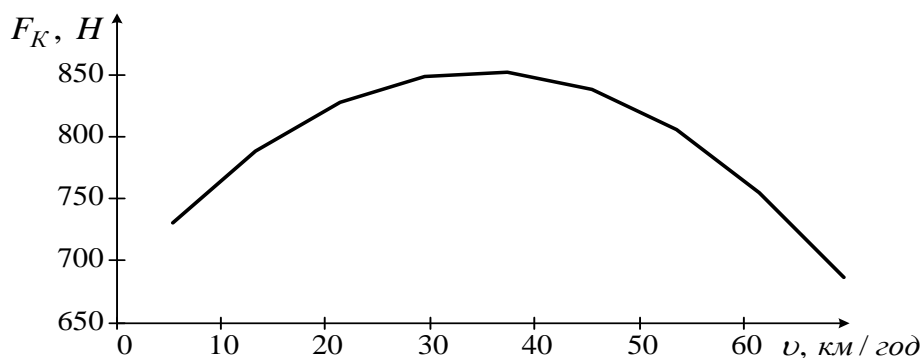


Рисунок 8 – Тягова характеристика електромобіля

2.3 Розрахунок динамічного фактору

Для порівняльної оцінки тягових характеристик електромобіля, незалежно від маси, використовується динамічний фактор. Побудова графіка динамічного фактора відбувається на основі рівняння:

$$D = \frac{F_K - F_e}{G_a}$$

Для розрахунку динамічного фактору за зчепленням скористаємося рівнянням:

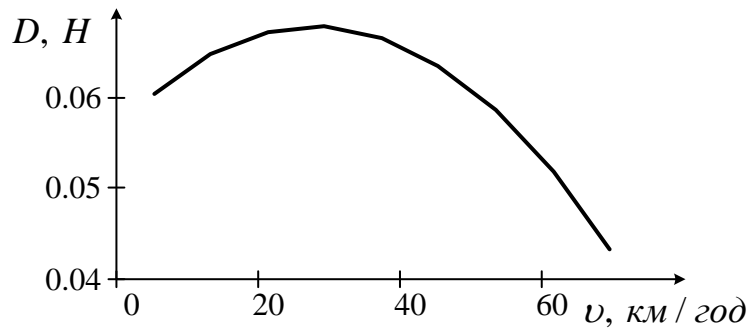
$$D_\varphi = \frac{F_\varphi - F_e}{G_a},$$

де $F_\varphi = G_a \cdot \varphi$ – сила зчеплення коліс з дорогою, Н; $\varphi = 0,6$ – коефіцієнт зчеплення на сухій дорозі.

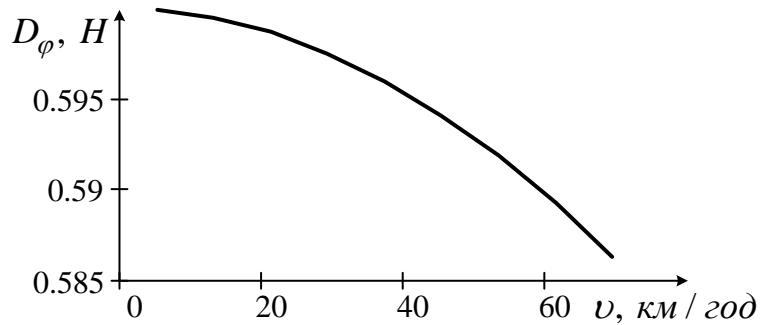
Розрахункові дані заносяться до таблиці 9, та будуються відповідні характеристики (рис. 9).

Таблиця 9 – Розрахункові дані динамічного фактору

ω , рад/с	20	50	80	110	140	170	200	230	260
D , Н	0.06	0.065	0.067	0.068	0.067	0.064	0.059	0.052	0.043
D_φ , Н	0.6	0.599	0.599	0.598	0.596	0.594	0.592	0.589	0.586



а)



б)

Рисунок 9 – Графіки динамічного фактору (а) та динамічного фактору за зчепленням (б)

2.4 Розрахунок та побудова графіка прискорень електромобіля

Даний графік показує величину прискорення, яку може мати проєктований електромобіль при різній швидкості руху, за умови руху по дорозі, яка характеризується коефіцієнтом f_0 .

Прискорення визначимо за формулою:

$$j = (D - f_0) \frac{g}{\delta},$$

де δ – коефіцієнт, що враховує обертові маси, та може бути розрахований за виразом:

$$\delta = 1 + \sigma_1 u_0^2 + \sigma_2,$$

для легкових автомобілів приймається $\sigma_1 = 0,05$, $\sigma_2 = 0,04$.

$$\delta = 1 + 0,05 \cdot 3,867^2 + 0,04 = 1,784.$$

Розрахункові дані заносяться до таблиці 10, по яким будується відповідна характеристика (рис. 10).

ω , рад/с	20	50	80	110	140	170	200	230	260
j , \ddot{m} / \dot{h}^2	0.222	0.246	0.259	0.263	0.256	0.239	0.212	0.175	0.127

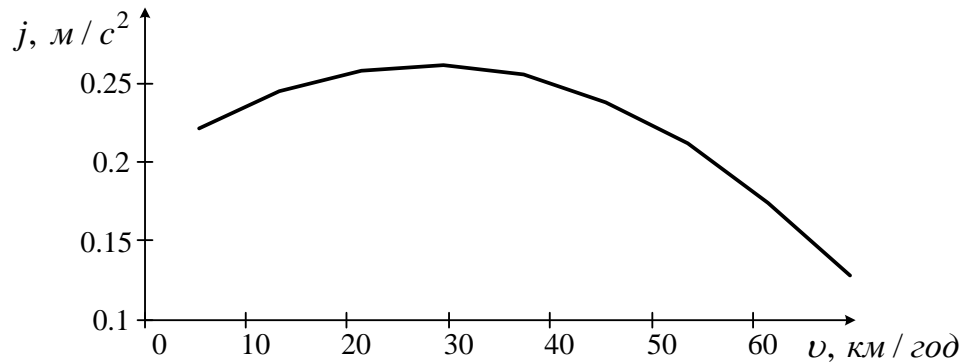


Рисунок 10 – Графік прискорення електромобіля

3 Розрахунок та побудова енергетичних характеристик електромобіля

3.1 Розрахунок витрати електричної енергії на рух електромобіля

Електрична енергія споживається електромобілем при русі та витрачається на подолання сил опору руху (зовнішніх сил, що діють на електромобіль).

Електрична енергія, що споживається електромобілем за час T , може бути виражена інтегралом:

$$E = \frac{\int_0^T P_{e\Phi} dt}{3600}$$

де E – витрата електричної енергії на рух; P – споживана потужність; T – час руху, с.:

$$T = \frac{L}{V},$$

де L – відстань ($L=50$ км); V – швидкість.

Розрахункові дані заносяться до таблиці 11, по яким будується відповідна характеристика (рис. 11).

Таблиця 11 – Розрахункові дані витрат електричної енергії

V , км/год	10	20	30	40	50	60	70
$P_{e\psi}$, кВт	4.937	5.961	7.119	8.477	10.102	12.062	14.422
E , кВт/год	4.231	5.109	6.102	7.266	8.659	10.339	12.361

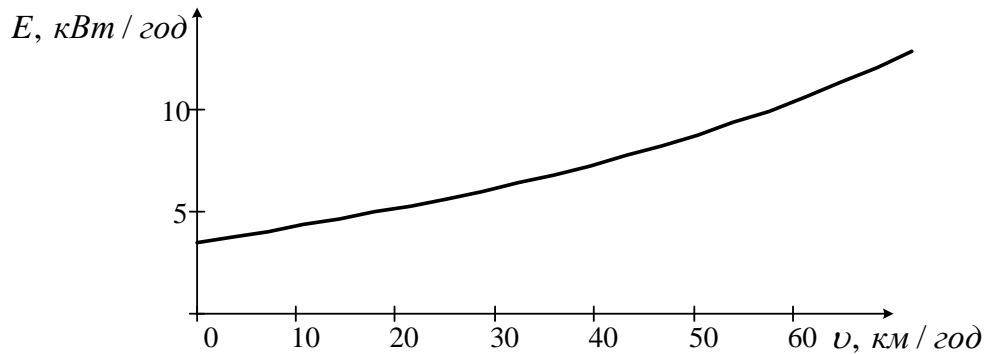


Рисунок 11 – Залежність витрати електричної енергії від швидкості руху

3.2 Розрахунок питомої споживаної потужності

Для оцінки ефективності роботи електромобілів вводиться поняття питомої витрати електричної енергії (Вт·год/т·км). Питома споживана потужність, витрачена на одиницю перевізної роботи визначається за виразом:

$$A = \frac{P_e \cdot T}{m \cdot L}$$

Розрахункові дані заносяться до таблиці 12, по яким будується відповідна характеристика (рис. 12).

Таблиця 12 – Розрахункові дані

V , км/год	10	20	30	40	50	60	70
P_e , кВт	0.958	1.982	3.14	4.498	6.123	8.083	10.443
A , кВт·год/т·км	0.078	0.081	0.085	0.091	0.1	0.11	0.121

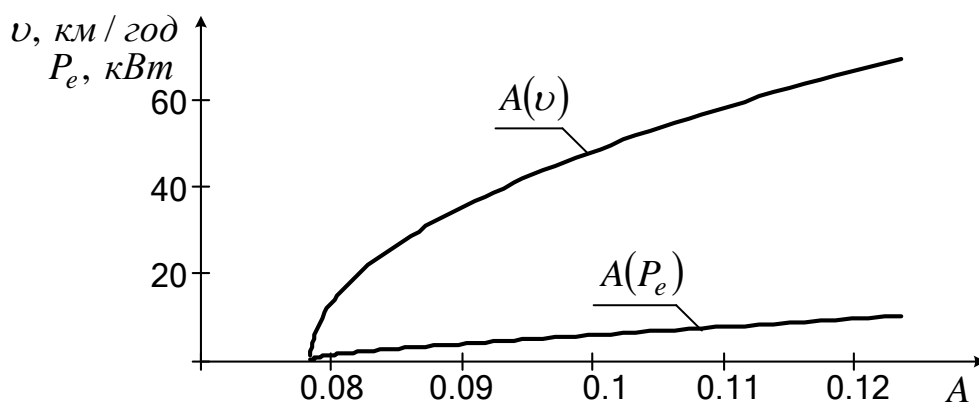


Рисунок 12 – Залежність питомої споживаної потужності від швидкості руху $A(v)$, та від потужності, що витрачається на рух $A(P_e)$

3.3 Розрахунок маси електрохімічного джерела струму

При розрахунку маси джерела струму будемо умовно вважати, що запас ходу електромобіля зростає за рахунок збільшення маси і питомої енергоємності джерела струму. Залежність маси джерела струму від необхідної величини запасу ходу електромобіля має вигляд:

$$m_a = \frac{m \cdot L}{p - L},$$

де p – відношення питомої енергоємності джерела струму до питомих витрат на переміщення електромобіля:

$$p = \frac{e}{A},$$

де e – питома енергоємність джерела струму Вт·год/кг (табл. 13);

Таблиця 13 – Питомі енергоємності джерел струму

Тип джерела струму	Питома енергоємність Вт·ч/кг
Свинцево - кислотні акумулятори	30 – 40
Нікель - кадмієві акумулятори	40 – 60
Літій - іонний акумулятор	150 – 200
Літій - фосфатні акумулятори	65
Нікель - марганцеві акумулятори	60 – 120
Цинк - повітряні	220

Розрахунок проведемо для Літій-іонних акумуляторних батарей. Розрахункові дані заносяться до таблиці 14, за якими будується відповідні характеристика (рис. 13).

Таблиця 14 – Розрахункові дані

V , км/год	10	20	30	40	50	60	70
P_e , кВт	0.958	1.982	3.14	4.498	6.123	8.083	10.443
m , кг	75.766	75.837	75.954	76.12	76.333	76.596	76.909

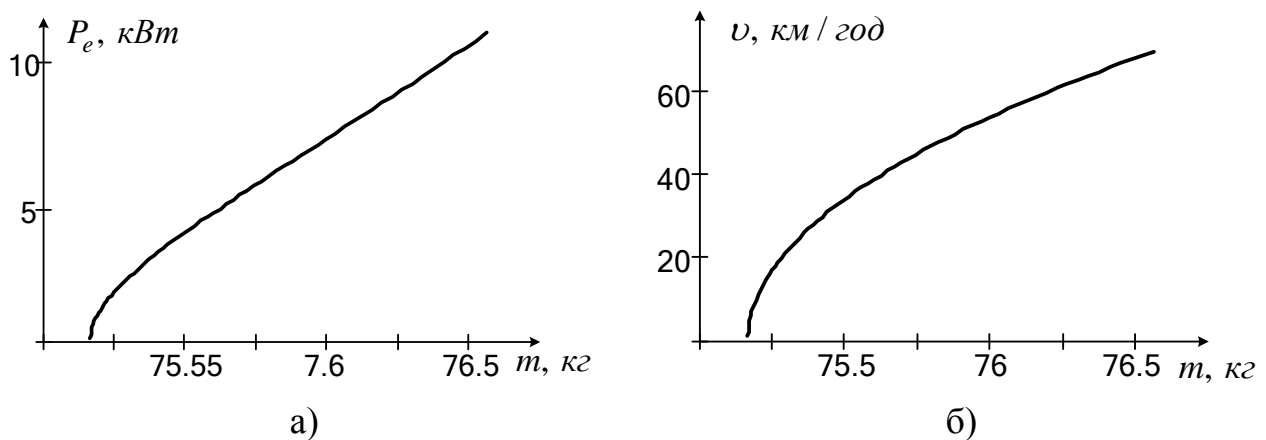


Рисунок 13 – Залежність маси джерела струму від потужності (а) та швидкості руху (б)

3.4 Запас ходу електромобіля

У загальному випадку запас ходу електромобіля можна розрахувати за формулою

$$L_z = \frac{e \cdot m_a}{m \cdot A}$$

Розрахункові дані заносяться до таблиці 15, за якими будується відповідні характеристика (рис. 14).

Таблиця 15 – Розрахункові дані

V , км/год	10	20	30	40	50	60	70
L_z , км	139.304	134.61	127.452	118.621	108.919	99.019	89.415

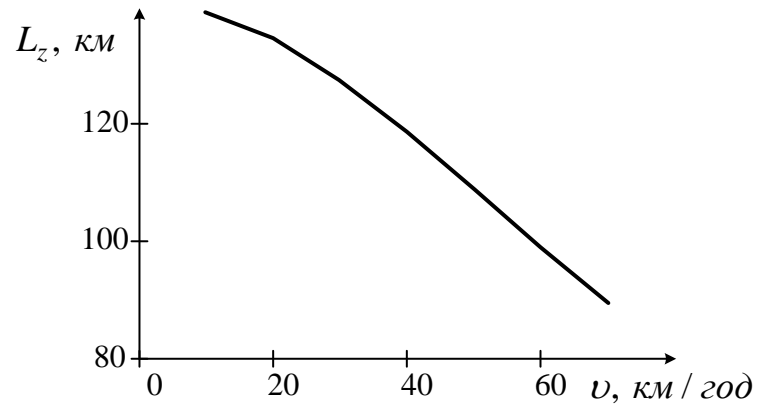


Рисунок 14 – Залежність запасу ходу електромобіля від швидкості руху

Таблиці А. 1 – Теоретичного питання

№ п/п	Питання
1	Наведіть структурну схему електропривода та охарактеризуйте його складові частини. Охарактеризуйте особливості роботи електродвигунів з автономними джерелами живлення. Наведіть класифікацію електродвигунів.
2	Що розуміють під керуванням параметрів електроприводів. Наведіть способи зміни параметрів електроприводів. Наведіть класифікацію технологічних механізмів, що використовують електричні двигуни з автономними джерелами живлення. Наведіть класифікацію енергетичних установок електродвигунів.
3	Охарактеризуйте основні ознаки енергетичних установок, що використовують паливні елементи. Поясніть необхідність використання послідовно-паралельного перемикачів паливних характеристик, наведіть їх вихідні характеристики. Охарактеризуйте основні ознаки енергетичних установок у яких відбувається накопичення енергії.
4	Перерахуйте вимоги, що висуваються до акумуляторних батарей. Яким чином змінюється зовнішня характеристика акумуляторних батарей залежно від заряду? Що являє собою електромеханічний накопичувач енергії? Наведіть приклад такого накопичувача. Перерахуйте недоліки, що характерні для електромеханічних накопичувачів енергії.
5	Надайте загальну характеристику енергетичних показників двигун-генераторних установок. Охарактеризуйте схеми силових кіл двигун-генераторних енергоустановок з тяговими двигунами постійного струму. Охарактеризуйте схеми силових кіл двигун-

	<p>генераторних енергоустановок з двигунами змінного струму. Наведіть зовнішню характеристику генератора. Яким чином відбувається регулювання їх вихідних параметрів?</p>
6	<p>Охарактеризуйте вимоги, що висуваються до генераторів. Наведіть відомі схеми збудження генераторів постійного струму. Надайте загальну характеристику комбінованих енергоустановок. Яким чином відбувається розподілення енергетичних потоків? Наведіть вихідні характеристики комбінованих енергоустановок, що використовують акумуляторні батареї та теплоелектричні перетворювачі.</p>
7	<p>Охарактеризуйте загальні вимоги до характеристик електродвигунів. Що розуміють під поняттям електричної стійкості? Охарактеризуйте умови електричної стійкості різних типів електродвигунів. Що розуміють під поняттям механічної стійкості? Охарактеризуйте умови механічної стійкості різних типів електродвигунів. Поясніть вплив нерівномірного розподілу навантаження між електродвигунами.</p>
8	<p>Наведіть порівняння характеристик двигунів з різними способами збудження при нерівномірному розподілі навантаження. Яким чином впливають коливання напруги живлення на характеристики тягових електродвигунів з різними системами збудження. Охарактеризуйте причини зміни споживаної потужності при русі на різних профілях дороги. За якими параметрами здійснюється обмеження пускових характеристик тягових двигунів?</p>
9	<p>Охарактеризуйте характерні зони обмеження характеристик. Поясніть причини погіршення умов зчеплення коліс з поверхнею. Яким чином впливає жорсткість характеристик електродвигунів на використання сили тяги за зчепленням? Поясніть, яким чином впливає схема з'єднання електродвигунів на силу тяги за зчепленням.</p>

10	<p>Яким чином здійснюється процес регулювання сили тяги електрорухомого складу? Наведіть приклад схеми регулювання сили тяги електрорухомого складу постійного струму. За якими параметрами здійснюється обмеження гальмівних характеристик двигунів? Охарактеризуйте характерні зони обмеження гальмівних характеристик.</p>
11	<p>Надайте загальну характеристику методів регулювання швидкості двигунів постійного струму. Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості тягового двигуна постійного струму послідовного збудження зміною напруги живлення. Дайте характеристику процесу регулювання швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження шляхом введення додаткового опору. Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження шляхом зміни магнітного потоку.</p>
12	<p>Охарактеризуйте принцип регулювання швидкості двигуна постійного струму змішаного збудження шляхом зміни магнітного потоку. Дайте характеристику процесу пуску двигунів з автономними джерелами живлення. Види систем пуску електродвигунів. Поясніть суть плавного реостатного пуску електродвигунів постійного струму. Дайте характеристику ступінчатого пуску електродвигунів з автономними джерелами живлення.</p>
13	<p>Яким чином відбувається пуск та регулювання швидкості електродвигунів за допомогою імпульсного регулювання. Наведіть схему імпульсного регулювання швидкості двигунів постійного струму. Яким чином змінюються вихідні показники перетворювача? Наведіть тягові характеристики електродвигунів з імпульсним керуванням. Охарактеризуйте характерні зони характеристики. Охарактеризуйте пуск та регулювання швидкості</p>

	електрорухомого складу однофазно-постійного струму.
14	Наведіть способи регулювання швидкості асинхронних електродвигунів. Дайте характеристику частотного способу регулювання швидкості асинхронних двигунів. Наведіть приклад побудови системи регулювання швидкості електропривода постійного струму з автономним джерелом живлення. Наведіть приклад побудови системи регулювання швидкості електропривода змінного струму з автономним джерелом живлення.
15	Наведіть класифікацію систем гальмування. Надайте характеристику механічного гальмування. Наведіть гальмівні характеристики. Поясніть принцип електричного гальмування. Дайте характеристику рекуперативного гальмування.
16	Охарактеризуйте умови електричної стійкості різних типів електродвигунів в режимі рекуперативного гальмування. Наведіть електромеханічні та гальмівні характеристики двигуна постійного струму змішаного збудження при рекуперативному гальмуванні. Наведіть схему рекуперативного гальмування двигуна постійного струму з незалежним збудженням, що дозволяє отримати м'які характеристики. Охарактеризуйте гальмівні характеристики в даному випадку. Поясніть принцип рекуперативного гальмування при імпульсному способі керування.
17	Наведіть схему та гальмівні характеристики електрорухомого складу однофазно-постійного струму при рекуперативному гальмування. Дайте загальну характеристику реостатному гальмування електродвигунів. Наведіть схему та гальмівні характеристики двигуна постійного струму з самозбудженням при реостатному гальмуванні. Наведіть схему та гальмівні характеристики двигуна постійного струму зі змішаним збудженням при реостатному гальмуванні.
18	Перерахуйте недоліки рекуперативного та реостатного

	<p>гальмуванні. Дайте загальну характеристику рекуперативно-реостатного гальмування електродвигунів. Наведіть схему та характеристики рекуперативно-реостатного гальмування двигунів постійного струму змішаного збудження. Наведіть приклад реалізації рекуперативного гальмування в електроприводах постійного струму з автономними джерелами живлення.</p>
19	<p>Наведіть приклад реалізації рекуперативного гальмування в електроприводах змінного струму з автономними джерелами живлення. Охарактеризуйте варіанти конструктивного виконання електроприводів електромобіля. Наведіть функціональну схему електропривода електромобіля. Дайте характеристику силового кола електромобіля.</p>
20	<p>Дайте характеристику енергетичного блока електромобіля. Дайте характеристику допоміжного службового блока електромобіля. Охарактеризуйте вимоги до електродвигунів великовантажних автомобілів. Поясніть принцип дії електропривода великовантажного автомобіля змінно-постійного струму.</p>
21	<p>Поясніть принцип дії електропривода великовантажного автомобіля постійного струму. Наведіть класифікацію електромеханічних трансмісій з комбінованими енергетичними установками. Охарактеризуйте загальні принципи функціонування електроприводів з комбінованими енергетичними установками. Наведіть послідовну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи послідовної електромеханічної трансмісії.</p>
22	<p>Наведіть паралельну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи паралельної електромеханічної трансмісії. Наведіть послідовно-паралельну структуру електромеханічної трансмісії. Охарактеризуйте режими роботи послідовно-паралельної електромеханічної трансмісії.</p>

Таблиця А. 2 – Вихідні параметри прототипу електромобіля

№ варіанту	B , мм	H , мм	m_0 , кг	m , кг	C_x	V_{\max} км/год	α , град	r_k , м
1	1420	1312	605	945	0,37	50	20	0,273
2	1554	1410	710	1135	0,37	60	12	0,26
3	1570	1370	840	1160	0,37	55	8	0,305
4	1611	1140	1355	1750	0,32	55	10	0,305
5	1550	1480	1045	1445	0,37	65	13	0,312
6	1620	1335	900	1325	0,32	70	15	0,266
7	1611	1440	1050	1450	0,32	55	17	0,312
8	1820	1490	1420	1820	0,39	60	15	0,346
9	1846	1476	1470	1870	0,38	50	12	0,305
10	2020	1580	2600	3162	0,4	45	14	0,406

Таблиця А. 3 – Параметри двигунів постійного струму послідовного збудження

Тип	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/хв	n_{\max} , об/хв	η
ДРТ-10А1	10	105	116	1575	3150	0,82
ДРТ-14	11,4	110	122	505	1845	0,785
ДРТ-23,5	9,4	185	61	1410	2500	0,85
ДРТ-13М	13,5	110	122	505	1845	0,78
ДРТ-14	15,8	145	132	700	1845	0,825
ДРТ-23,5	16,2	130	152	600	2500	0,81
ДРТ-14	14	130	132	615	1845	0,816
ДРТ-23,5	18,7	145	152	670	2500	0,817
ДРТ-13М	14,6	145	122	700	1845	0,825
ДРТ-23,5	23,5	185	152	900	2500	0,85

5 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

Розподіл балів, що отримують студенти

Види занять	Максимальна сума балів	
	денна форма	заочна форма
Лекції	16	10
Лабораторні роботи	10	5
Практичні заняття	10	5
Поточний контроль: – захист лабораторних робіт; – захист практичних робіт; – контрольна робота.	10 10 –	10 10 10
Проміжний контроль: – змістовий модуль 1; – змістовий модуль 2; – змістовий модуль 3.	8 8 8	10 10 10
Підсумковий контроль: Іспит	20	20
Усього	100	100

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Электромобили (методы расчета): Учебное пособие / Б.П. [Бусыгин Б.П.]. М.: Московский автомобильно-дорожный институт, 1979. 72 с.
2. Щетина В.А. Электромобиль: Техника и экономика / В.А. Щетина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центер, В.А. Богомазов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 253 с.
3. Туревский И.С. Теория автомобиля: Учебное пособие / И.С. Туревский. М.: Высш. шк., 2005. 240 с.
4. Гаспарян Г.А. Конструкция, основы теории и расчета автомобиля: Учебник [для техникумов] / Г.А. Гаспарян. М.: Машиностроение, 1978. 351 с.
5. Основы электрического транспорта / М. А. Слепцова, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др. Москва : Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.
6. Основы электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. Под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
7. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. Москва : Энергоиздат, 1981. 576 с.
8. Грищенко А. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава /А. В. Грищенко, В. В. Стрекопытов. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 320 с.
9. Осипов С. И. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов колледжей ж/д тр-та / С. И. Осипов, С. С. Осипов Москва : УМК МПС России, 2000. 592 с.

10. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда / В. К. Калинин. Москва : Транспорт, 1991. 480 с.

11. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. Л.: Энергия, 1974. 840 с.

12. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. Москва : Высшая школа, 1975. 319 с.

13. Байрыева Л. С. Электрическая тяга: городской наземный транспорт / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. Москва : Транспорт, 1986. 206 с.

Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Електропривод з автономними джерелами живлення» для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Укладачі: к. т. н., доц. А. П. Калінов,
к. т. н., доц. В. О. Мельников
ст. викладач О. А. Хребтова

Рецензент к. т. н., доц. Ю. В. Зачепа

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16 Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600