

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

Український державний університет
науки і технологій

Кафедра «Електрорухоми́й склад залізниць»

В авторській редакції

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ
Навчально-методичні рекомендації до виконання контрольного
завдання

Електронне видання

Дніпро 2026

УДК 629.423: 681.5(076.1)

A22

Упорядники:

*Афанасов Андрій Михайлович,
Арпуль Сергій Вікторович,
Шаповалов Олександр Сергійович*

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
«Електровози та електропоїзди»
Протокол № 4 від 19.03.2026

A22 Автоматизація електрорухомого складу [Текст]: Навчально-методичні рекомендації до виконання контрольного завдання/ упоряд.: А. М. Афанасов, С. В. Арпуль, О. С. Шаповалов; Укр. держ.ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро: УДУНТ, 2026 – 26 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами денної та заочної форм навчання спеціальності G3 «Електрична інженерія» під час виконання контрольного завдання з дисципліни «Автоматизація електрорухомого складу».

Методичні вказівки призначено для студентів другого (магістерського) рівня освіти.

Іл. – 6. Табл. – 12. Бібліогр. – 3 назв.

© Афанасов А. М., Арпуль С. В,
Шаповалов О. С., укладання, 2026

© Український державний університет
науки і технологій. ННІ «Дніпровський
інститут інфраструктури і транспорту»

ЗМІСТ

	Стор.
Загальні вимоги	4
1 Вихідні дані на індивідуальну роботу.....	6
2 Порядок виконання індивідуальної роботи.....	8
2.1 Розробка принципової електричної схеми ВІП	8
2.2 Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі тяги	9
2.3 Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі рекуперативного гальмування	13
2.4 Розрахунок характеристик ТЕД при живленні від ВІП	14
2.5 Розрахунок струмових характеристик ТЕД і гальмівних характеристик електровоза при рекуперативному гальмуванні	16
Питання для самоконтролю	20
Бібліографічний список	22
Додаток А.....	23

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ

Завдання присвячено аналізу автоматичного керування випрямно-інверторним перетворювачем (ВІП) електровозу змінного в режимах тяги та рекуперативного гальмування. На електровозі змінного струму використано плавне чотирьохзонне фазо-імпульсне регулювання напруги на тягових двигунах. Для забезпечення регулювання в чотирьох зонах вторинна обмотка тягового трансформатора має три секції, дві з яких мають однакову напругу неробочого ходу $U_{\text{нх}}$, а третя – $2U_{\text{нх}}$. Регулювання потужності тягового електроприводу електровозу до розрахункової швидкості виконується шляхом плавної зміни напруги на тягових електродвигунах, а на високих швидкостях – за рахунок послаблення їх збудження.

В режимі тяги електровозу тяговий перетворювач ВІП працює як керований випрямляч і живить тягові двигуни ТЕД послідовного збудження. Для згладжування пульсацій випрямленого струму в коло тягових двигунів включено згладжуючий реактор. В режимі рекуперації тяговий перетворювач працює як інвертор струму і отримує живлення від якорів тягових двигунів. Обмотки збудження тягових двигунів підключені до окремого керованого тиристорного перетворювача з нульовим виводом [1, 2].

При рекуперації на високих швидкостях руху задіяні всі три обмотки тягового трансформатора, а регулювання струму рекуперації забезпечується зміною струму збудження. При низьких швидкостях електровозу регулювання струму рекуперації здійснюється за рахунок зміни кількості обмоток трансформатора і регулювання куту відкриття тиристорів інвертора.

В завданні необхідно провести аналіз алгоритму керування тяговим електроприводом в режимах тяги та рекуперативного гальмування та розрахувати характеристики електровоза в обох режимах.

Пояснювальна записка до індивідуальної роботи має бути надрукована листах паперу формату А4 чорним кольором. Оформлення записки здійснюється з використанням текстового редактора Microsoft Office Word, шрифтом Times New Roman, інтервалом 1,5 рядки, розміром 14 пт, розміри полів: лівого – 30, правого – 10, верхнього і нижнього – 20 мм. Креслення виконуються в надрукованому вигляді з дотриманням існуючих стандартів до позначення елементів електричних схем.

Розрахунки виконуються в послідовності, наведеної в методичних вказівках. На кожному етапі розрахунку вказують його порядковий номер і на-

йменування величини, що розраховується. Потім записується розрахункова формула або, якщо потрібно, дається її вивід. У формулах розшифровуються тільки ті символи і числові коефіцієнти, які не були пояснені на попередніх етапах розрахунку або в вихідних даних. Після цього у формулу підставляються числові значення змінних і, опускаючи проміжні обчислення, наводиться результат розрахунку. Розрахунки виконуються з точністю до трьох значущих цифр. У розрахунках використовується міжнародна система одиниць СІ.

Порядок захисту та критерії оцінювання контрольного завдання. Під час захисту індивідуальної роботи студент відповідає на запитання викладача, що стосуються практичної частини курсу «Автоматизація електрорухомого складу», зокрема й методів та порядку розрахунків, що виконуються в індивідуальній роботі. Доповіді повинні бути чіткими та змістовними.

Шкала ЕКТС	Очікуванні результати
90-100	Здобувач освіти бездоганно виконав та оформив індивідуальну роботу, правильно відповідає на всі запитання, може чітко пояснити та обґрунтувати методику та порядок розрахунків тягових та рекуперативних характеристик електровоза змінного струму з тиристорним перетворювачем
70-89	Здобувач освіти правильно виконав індивідуальну роботу, але не може правильно відповісти на запитання, що стосуються обґрунтування методики та порядку розрахунків тягових та рекуперативних характеристик електровоза змінного струму з тиристорним перетворювачем
50-69	Здобувач освіти правильно виконав індивідуальну роботу, але припускає значні помилки під час відповіді на запитання, що стосуються теоретичного курсу дисципліни
1-49	Здобувач освіти неправильно виконав та оформив індивідуальну роботу та не може відповісти на прості запитання, що стосуються методики виконання цієї роботи

1 ВИХІДНІ ДАНІ ДО ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні вихідні дані

Таблиця 1.1

Позначення	Параметр	Значення	Одиниці вимірювання
P	Маса електровоза	184	т
	Кількість осей електровоза	8	–
f	Частота напруги к. м.	50	Гц
α_0	Мінімальний кут управління ВІП	10	ел. град.
δ_0	Кут запасу при інвертуванні	20	ел. град.
R_B	Опір баластного резистора	0,12	Ом

Таблиця 1.2

Позначення	Параметр	Тип тягового двигуна		Одиниці вимірювання
		НБ418К6	НБ514	
$U_{дв.н}$	Номінальна напруга на колекторі	950	980	В
I_T	Годинний струм	880	905	А
$R_я$	Опір обмотки якоря	0,015	0,016	Ом
$R_{гп}$	Опір обмотки головних полюсів	0,103	0,096	Ом
$R_{дп}+R_{ко}$	Опір обмоток додаткових полюсів і компенсаційної обмотки	0,0162	0,018	Ом
$L_{дв}$	Індуктивність обмоток ТЕД	0,482	0,57	мГн
β_n	Номінальний коефіцієнт послаблення збудження	0,96	0,96	–
β_1	Коефіцієнт послаблення збудження першого ступеня	0,7	0,7	–

Таблиця 1.3

Позиція (зона регулювання)	1	2	3	4
Напруга короткого замикання трансформатора, $u_{кз}$, %	6,0	7,0	8,0	9,0
Номінальний струм трансформатора, I_n , А	1700	1700	1700	1700
Опір мережевої обмотки трансформатора при 75°C , R_1 , Ом	0,5	0,5	0,5	10,5
Опір тягових обмоток трансформатора при температурі 75°C , R_2 , Ом	0,0022	0,0044	0,055	0,0076

1.2 Індивідуальні вихідні дані

Таблиця 1.4

Параметр	Передостання цифра номеру завдання									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напруга контактної мережі, кВ	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26
Індуктивність сгладжуючого реактора $L_{ср}$, мГн	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5	5,2	5,4	5,6	5,8
Опір сгладжуючого реактора $R_{ср}$, мОм	5	5,2	5,5	5,8	6	6,2	6,5	6,8	7	7,2

Таблиця 1.5

Параметр	Остання цифра номеру завдання									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Коефіцієнт трансформації на 4-й позиції $K_{т4}$	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5
Тип тягового двигуна	НБ-418К6	НБ-514	НБ-418К6	НБ-514	НБ-418К6	НБ-514	НБ-418К6	НБ-514	НБ-418К6	НБ-514

2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

2.1 Розробка принципової електричної схеми ВП

За основу при розробці схеми ВП вибирається силова схема електровоза змінного струму, наведена на рис. 2.1. В даному розділі студент повинен викласти принцип плавного тиристорного безконтактного регулювання напруги на тягових двигунах, а також описати роботу системи автоматичного керування ВП в режимі тяги і рекуперативного гальмування [1-3].

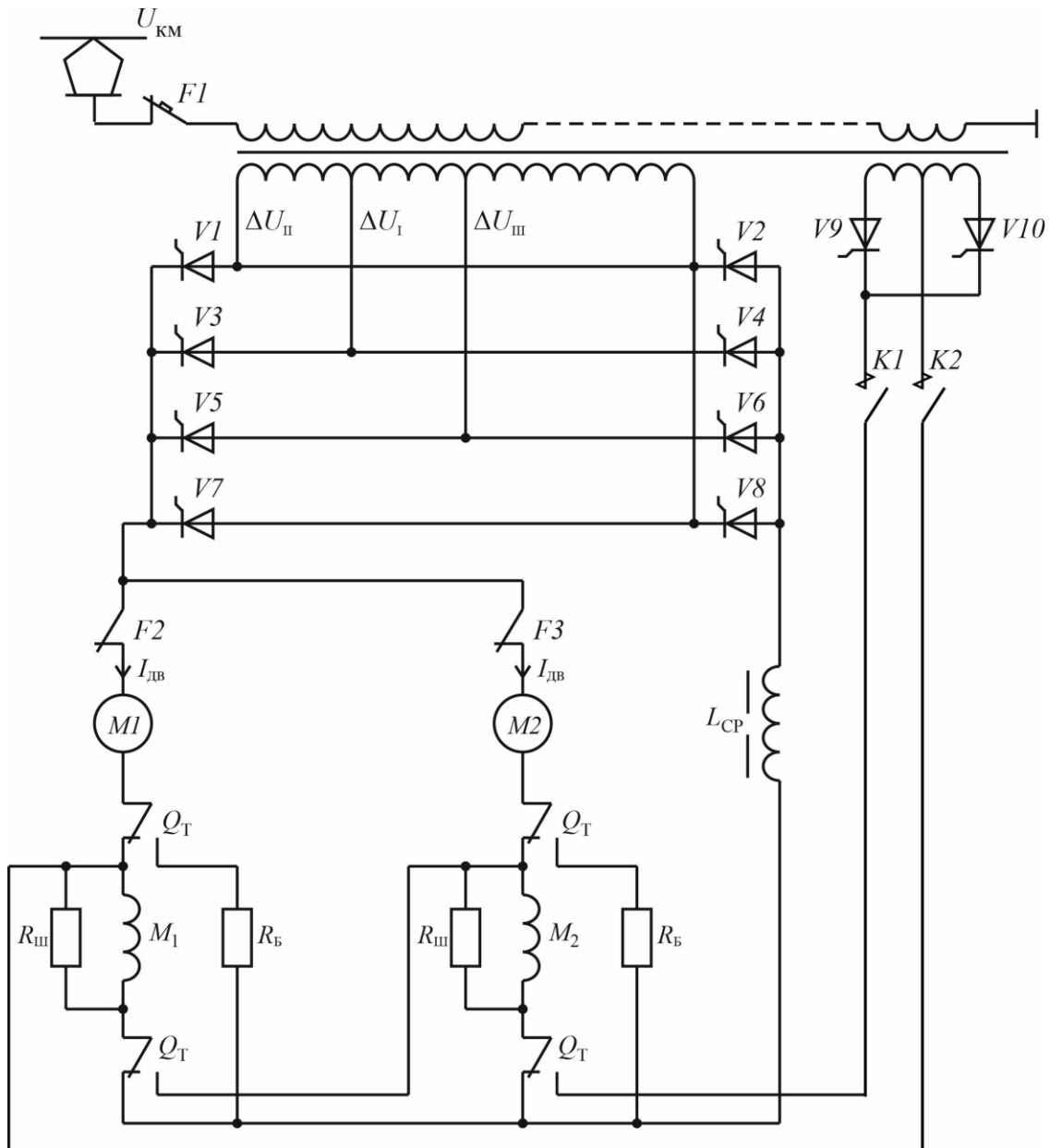


Рис. 2.1. Електрична схема електровоза змінного струму

2.2. Розрахунок зовнішньої характеристики ВПІ в режимі тяги

Зовнішня характеристика випрямляча представляє собою залежність напруги на тягових двигунах від випрямленого струму $U_{дв}$ (I_d) та розраховується за формулою [1,2]

$$U_{дв} = U_{dxx} - \Delta U_x - \Delta U_R - \Delta U_B; \quad (1)$$

$$U_{дв} = 0,9 \cdot U_{xx} \cdot \cos \alpha_0 - \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot X_T \cdot I_d - \left(\xi \cdot R_{\Pi} \cdot K_{\text{еф}}^2 + R_d \cdot K_{\text{вєф}}^2 \right) \cdot I_d - \Delta U_B,$$

де $U_{дв}$ – напруга на тяговому двигуні, В;

U_{xx} – номінальна напруга холостого ходу трансформатора на розрахункових позиціях, В;

α_0 – мінімальний кут управління, $\alpha_0 = 10$ ел. град.;

λ – коефіцієнт, який враховує втрати напруги за рахунок пульсацій випрямленого струму в індуктивних опорах у міжкомутаційний період;

X_T – індуктивний опір кола струму комутації, Ом;

I_d – випрямлений струм одного перетворювача, А;

ξ – коефіцієнт, який враховує, що у період комутації випрямлений струм протікає, обминаючи кола змінного струму, $\xi = 0,7$;

R_{Π} – активний опір кола змінного струму трансформатора, Ом;

$K_{\text{еф}}$ – коефіцієнт ефективності змінного струму;

$K_{\text{вєф}}$ – коефіцієнт ефективності випрямленого струму;

R_d – активний опір кола випрямленого струму, Ом;

ΔU_B – спад напруги на тиристорах випрямляча, В.

Номінальна напруга неробочого ходу трансформатора на кожній позиції (зоні) розраховується за формулою

$$U_{xx} = \frac{U_{км}}{K_{тn}}, \quad (2)$$

де $K_{тn}$ – коефіцієнт трансформації на позиції (зоні) « n ».

Коефіцієнт трансформації K_T для кожної зони « n » визначається за формулою

$$K_{тn} = \frac{4}{n} K_{т4}, \quad (3)$$

де n – номер позиції (зони).

Розрахунковий випрямлений струм для однієї перетворювальної установ-
ки дорівнює

$$I_d = 2I_{дв} \quad (4)$$

де $I_{дв}$ – струм одного ТЕД.

Враховуючи, що зовнішня характеристика ВІП прямолінійна, розрахунок
виконуємо для двох точок:

– холостий хід випрямляча, $I_d = 0$;

– годинне навантаження, $I_d = 2I_r$, де I_r – годинний струм ТЕД.

Індуктивний опір кола струму комутації у припущенні, що потужність
контактної мережі нескінченна [4-6]

$$X_T = \frac{u_{кз} \cdot U_{xx}}{I_H \cdot 100}, \quad (5)$$

де $u_{кз}$ – напруга короткого замикання трансформатора, %;

I_H – номінальний струм трансформатора, А.

Активний опір кола змінного струму [3]

$$R_n = 2 \left[\frac{R_1}{K_T^2} + \frac{R_2}{2} \right], \quad (6)$$

де R_1 – опір обмотки мережі трансформатора, Ом;

R_2 – опір тягової обмотки трансформатора на розрахунковій позиції, Ом.

Активний опір кола випрямленого струму дорівнює активному опору
згладжуючого реактора

$$R_d = R_{ср}. \quad (7)$$

Коефіцієнти λ , $K_{сф}^2$ і $K_{всф}^2$ визначаються за величиною пульсації випрям-
леного струму:

$$\lambda = 1 + 0,2K_{п}; \quad (8)$$

$$K_{сф}^2 = (0,88 + 0,1K_{п})^2; \quad (9)$$

$$K_{всф}^2 = 1 + 0,13K_{п}^2, \quad (10)$$

де $K_{п}$ – величина відносної пульсації

$$K_{\Pi} = \sigma \cdot \frac{0,9 \cdot U_{\text{xx}}}{\omega \cdot L_d \cdot I_d}, \quad (11)$$

де ω – циклічна частота напруги живлення, с^{-1} ;

L_d – індуктивність кола випрямленого струму, мГн, яка дорівнює сумі індуктивностей згладжуючого реактора і двох паралельно ввімкнених тягових двигунів;

σ – коефіцієнт, який залежить від суми μ кута комутації γ та мінімального кута управління α_0 і визначається за кривою на рис. 3 [3].

$$L_d = L_{\text{ср}} + \frac{L_{\text{дв}}}{2}, \quad (12)$$

де $L_{\text{дв}}$ – індуктивність обмоток тягового двигуна. У розрахунку враховується індуктивність якоря, компенсаційної обмотки, додаткових полюсів. Індуктивність обмотки збудження не враховується, тому що вона зашунтована резистором.

$$\mu = (\gamma + \alpha_0) = \arccos \left[\cos \alpha_0 - \frac{\sqrt{2} \cdot I_d \cdot X_T \cdot 1,05}{U_{\text{xx}}} \right], \quad (13)$$

де 1,05 – коефіцієнт, який враховує вплив активних опорів кола змінного струму.

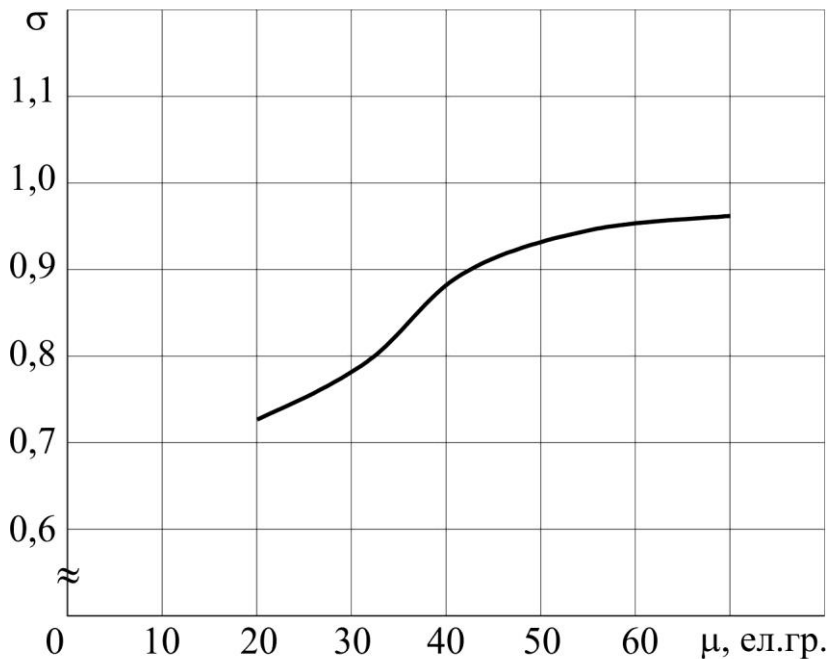


Рис. 2.2. Залежність $\sigma = f(\mu)$ для $\alpha_0 = 10$ ел. гр.

Падіння напруги у перетворювачі

$$\Delta U_B = 2 \cdot U_{cp} m, \quad (14)$$

де $U_{cp} = 0,63 \text{ В}$ – середнє падіння напруги на тиристорі;

m – кількість послідовно ввімкнених тиристорів двох плеч мосту, яка залежить від зони регулювання; $m_1 = 4$; $m_2 = m_3 = 5$; $m_4 = 6$.

Результати розрахунку зовнішньої характеристики випрямляча заносяться до табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Позначення	Розрахункові формули	Одиниці	Позиція			
			1	2	3	4
U_{xx}	(2)	В				
U_{dxx}	(1)	В				
I_d	(4)	А				
$u_{кз}$	табл. 1.3	%				
X_T	(5)	Ом				
μ	(13)	ел. град.				
σ	рис. 4.1	–				
L_d	(12)	мГн				
$K_{по}$	(11)	–				
λ	(8)	–				
ΔU_x	(1)	В				
K_T	(3)	–				
$R_{п}$	(6)	Ом				
$K_{сф}^2$	(9)	–				
$K_{всф}^2$	(10)	–				
ΔU_R	(1)	В				
ΔU_B	(14)	В				
$U_{дв}$	(1)	В				

Загальний вигляд зовнішня характеристика ВІП в режимі тяги наведений на рис. А.1.

2.3 Розрахунок зовнішньої характеристики ВІП в режимі рекуперативно-го гальмування [1-3]

Зовнішня характеристика інвертора розраховується за формулою:

$$U_{дв} = U_{dxx} - \Delta U_x + \Delta U_R + \Delta U_B; \quad (15)$$

$$U_{дв} = 0,9 \cdot U_{xx} \cdot \cos \delta_0 - \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot X_T \cdot I_d + \left(\xi \cdot R_n \cdot K_{эф}^2 + R_d \cdot K_{всф}^2 \right) \cdot I_d + \Delta U_B,$$

де δ_0 – кут запасу інвертора.

Всі величини, які входять до виразу (15), крім R_d , визначаються за тими ж формулами, що і при розрахунку зовнішньої характеристики ВІП в режимі тяги.

Активний опір кола постійного струму при рекуперації дорівнює

$$R_d = R_{cp} + \frac{R_B}{2}, \quad (16)$$

де R_B – величина опору баластного резистора у колі одного ТЕД.

Коефіцієнт σ в формулі (11) визначається для режиму рекуперації по кривим на рис. 5 і залежить від суми μ' кута комутації γ і кута запасу інвертора δ_0 .

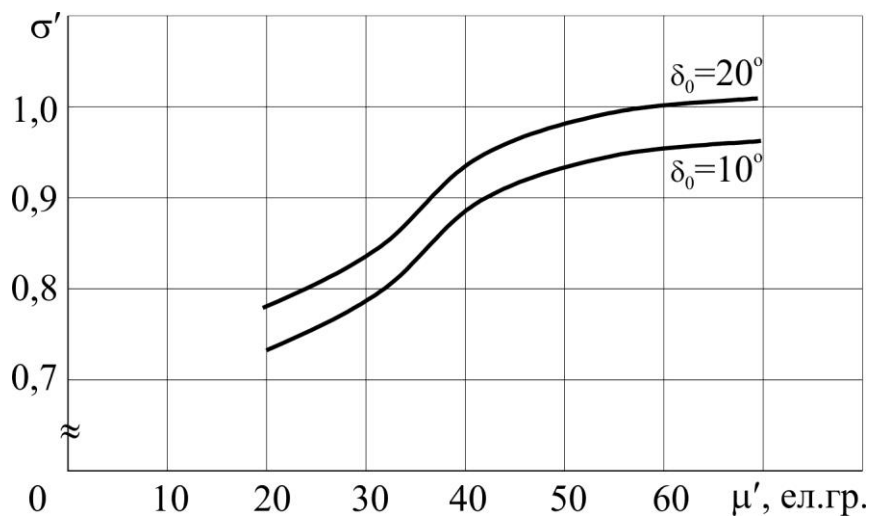


Рис. 2.3. Залежність $\sigma' = f(\mu')$

$$\mu' = \gamma + \delta_0 = \arccos \left[\cos \delta_0 - \frac{\sqrt{2} \cdot I_d \cdot X_T \cdot 1,05}{U_{xx}} \right]. \quad (17)$$

Результати розрахунку зовнішньої характеристики інвертора заносяться до табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Позначення	Розрахункові формули	Одиниці	Позиція			
			1	2	3	4
U_{xx}	(2)	В				
U_{dxx}	(15)	В				
I_d	(4)	А				
$u_{кз}$	табл. 1.3	%				
X_T	(5)	Ом				
μ'	(17)	ел. град.				
σ'	рис. 4.2	–				
L_d	(12)	мГн				
$K_{по}$	(11)	–				
λ	(8)	–				
ΔU_x	(15)	В				
K_T	(6)	–				
$R_{п}$	(6)	Ом				
$K_{еф}^2$	(9)	–				
$K_{вeф}^2$	(10)	–				
ΔU_R	(15)	В				
ΔU_B	(14)	В				
$U_{дв}$	(15)	В				

Зовнішня характеристика інвертора має вигляд відповідно рис. А.2.

2.4 Розрахунок характеристик ТЕД при живленні від ВП

В даному розділі курсового проекту необхідно розрахувати і побудувати швидкісні характеристики ТЕД при номінальному та послабленому збудженні з урахуванням зовнішньої характеристики випрямляча. Також необхідно розрахувати та побудувати обмеження струму ТЕД по зчепленню. Вихідними даними для розрахунку є характеристики ТЕД при номінальній напрузі [3].

Перерахунок швидкісної характеристики ТЕД виконується за формулою:

$$v = v_n \frac{U_{дв} - I_{дв} \cdot R_{дв}}{U_{двн} - I_{дв} \cdot R_{дв}}, \quad (18)$$

де v_n – швидкість електровоза, яка відповідає струму $I_{дв}$ при номінальній напрузі і визначається по вихідним характеристикам ТЕД;

$R_{дв}$ – активний опір обмоток ТЕД при температурі 110° С.

$$R_{дв} = R_я + \beta \cdot R_{гп} + R_{дп} + R_{ко}, \quad (19)$$

де $R_я$, $R_{гп}$, $R_{дп}$, $R_{ко}$ – опори якоря, головних полюсів, допоміжних полюсів та компенсаційної обмотки відповідно;

β – коефіцієнт послаблення поля ТЕД.

Необхідно виконати перерахунок швидкісних характеристик ТЕД на чотирьох позиціях для двох значень коефіцієнта послаблення поля: номінального β_n та першого ступеня послаблення β_1 . Результати розрахунку заносяться до табл. 2.3.

Обмеження струму ТЕД за умовами зачеплення є залежність максимального допустимого струму ТЕД від швидкості руху електровоза.

Максимальна сила зачеплення коліс з рейкою визначається за формулою

$$F_{зч} = P_0 \cdot \psi_k, \quad (20)$$

де P_0 – навантаження на вісь електровоза, Н;

ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення.

Для електровозів змінного струму з плавим регулюванням напруги на тягових електродвигунах [1]

$$\psi_k = 0,294 + \frac{4,2}{50 + 6v} - 0,00063v.$$

Максимально допустимий струм ТЕД за умови зчеплення визначається по характеристикам тяги $F_{кд} = f(I)$ з умови $F_{кд} = F_{зч}$.

Таблиця 2.3

$I_{дв}, А$							
$v_H, км/г$	НП						
	ОП						
I зона	$U_{дв}, В$						
	$v, км/г$	НП					
		ОП					
II зона	$U_{дв}, В$						
	$v, км/г$	НП					
		ОП					
III зона	$U_{дв}, В$						
	$v, км/г$	НП					
		ОП					
IV зона	$U_{дв}, В$						
	$v, км/г$	НП					
		ОП					

Обмеження струму по зчепленню розраховується для номінального та послабленого (ОП1) поля і наноситься на швидкості характеристики ТЕД.

Розрахунок ведеться в табличній формі, результати розрахунку зводяться до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

$v, км/г$							
Ψ_K							
$F_{кд}, Н$							
$I_{max}, А$	НП						
	ОП						

2.5 Розрахунок струмових характеристик ТЕД і гальмівних характеристик електровоза при рекуперативному гальмуванні

2.5.1 Струмові характеристики при рекуперативному гальмуванні є залежності струму ТЕД від швидкості руху [2] і розраховуються для чотирьох зон регулювання при струмі збудження, який дорівнює годинному струму ТЕД, а також для четвертої зони регулювання при струмах збудження, рівних 800, 700, 600, 500, 400, 300 А.

Враховуючи, що струмові характеристики ТЕД при рекуперації прямолінійні, розрахунок ведеться для двох точок: $I_{дв} = 0$; $I_{дв} = I_{г}$.

Швидкість електровоза визначається за формулою

$$v = \frac{E}{C_v \cdot \Phi}, \quad (21)$$

де E – е. р. с. ТЕД, В;

$C_v \Phi$ – питома е. р. с. ТЕД, $\frac{В \cdot Г}{км}$.

Е. р. с. ТЕД в генераторному режимі

$$E = U_{дв} + I_{дв} \cdot R_{дв}, \quad (22)$$

де $U_{дв}$ – напруга на ТЕД, яка відповідає гальмівному струму $I_{дв}$ і визначається за зовнішньою характеристикою інвертора.

Залежність питомої е. р. с. від струму збудження I_3 може бути знайдена з швидкісної характеристики ТЕД для номінальної напруги U_n при $\beta = \beta_n$ за формулою

$$C_v \Phi = \frac{U_{двн} - R_{дв} \cdot I_{дв}}{v}. \quad (23)$$

Результати розрахунку зводяться до табл. 2.5.

Таблиця 2.5

$I_3, А$	300	400	500	600	700	800	$I_{г}$
$v, км/Г$							
$C_v \Phi, В \cdot Г/км$							

2.5.2 Гальмівні характеристики електровоза при рекуперативному гальмуванні є залежністю гальмівної сили електровоза від швидкості руху і розраховується для тих режимів, що і струмові характеристики ТЕД [2,3].

Гальмівна сила восьмивісного електровоза визначається за формулою

$$B_{г} = 8 \cdot (3,67 \cdot C_v \Phi \cdot I_{дв} + \Delta B), \quad (24)$$

де ΔB – гальмівне зусилля ТЕД, яке обумовлене механічними та магнітними втратами в ТЕД.

Для спрощення розрахунку приймаємо, що ΔB складає приблизно 5% від електромагнітного гальмівного зусилля. Тоді

$$B_{\Gamma} = 30,8 \cdot C_v \Phi \cdot I_{\text{дв}}, \quad (25)$$

Результати розрахунку характеристик струму ТЕД для чотирьох зон регулювання при струмі збудження $I_3 = I_{\Gamma}$ заносяться до табл. 2.6, а для значень струму збудження $I_3 < I_{\Gamma}$ четвертої зони – до табл. 2.7.

Таблиця 2.6

	I зона		II зона		III зона		IV зона	
	$I_{\text{дв}} = 0$	$I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$	$I_{\text{дв}} = 0$	$I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$	$I_{\text{дв}} = 0$	$I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$	$I_{\text{дв}} = 0$	$I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$
$U_{\text{дв}}, \text{В}$								
$I_{\text{дв}} \cdot R_{\text{дв}}, \text{В}$								
$E, \text{В}$								
$C_v \Phi, \text{В} \cdot \text{Г/км}$								
$v, \text{км/Г}$								

Таблиця 2.7

$I_3, \text{А}$		300	400	500	600	700	800
$C_v \Phi, \text{В} \cdot \text{Г/км}$							
$I_{\text{дв}} = 0$	$E, \text{В}$						
	$v, \text{км/Г}$						
$I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$	$E, \text{В}$						
	$v, \text{км/Г}$						

Значення $C_v \Phi$ в табл. 2.6 відповідає $I_3 = I_{\Gamma}$ і однаково для всіх зон регулювання.

Значення E в табл. 2.7. при кожному значенні струму якоря $I_{\text{дв}}$ береться з табл. 2.6. і приймається однаковим для всіх значень I_3 . Значення $C_v \Phi$ в табл. 2.7, які відповідають I_3 , беруться з табл. 2.5, при цьому з метою спрощення розрахунків не враховується розмагнічуюча дія реакції якоря при струмах збудження, менших I_{Γ} .

Результати розрахунку гальмівних характеристик електровоза заносяться до табл. 2.8. Гальмівна сила електровоза при струмі якоря, рівному нулю, приймається також рівною нулю. Розрахунок гальмівної сили B_{Γ} виконується тільки для струму якоря $I_{\text{дв}} = I_{\Gamma}$. При $I_3 = I_{\Gamma}$ значення B_{Γ} є однаковим для всіх зон регулювання.

Таблиця 2.8

I_3, A							
$C_v \Phi, B \cdot Г / км$							
$B_Г, Н$							
$v, км / Г$							

Струмові характеристики ТЕД і гальмівні характеристики електровоза будуються в масштабі, зручному для використання. Значення швидкості при побудові гальмівних характеристик беруться з табл. 2.6, 2.7.

На струмові характеристики ТЕД і гальмівні характеристики електровоза наносяться обмеження по зчепленню та комутації.

2.5.3 Розрахунок обмеження по зчепленню

Сила зчеплення коліс з рейками при рекуперативному гальмуванні

$$B_{зч} = \psi' \cdot P, \quad (26)$$

де ψ' – розрахунковий коефіцієнт зчеплення в режимі гальмування;

P – зчіпна вага електровоза, Н.

$$\psi' = 0,8 \cdot \psi, \quad (27)$$

де ψ – розрахунковий коефіцієнт зчеплення в режимі тяги.

Результати розрахунку заносяться до табл. 2.9, яка виконується аналогічно табл. 2.4. Значення максимального гальмового струму за умовами зчеплення визначаються за формулою (25).

Таблиця 2.9

$v, км / Г$							
ψ'							
$B_{зч}, Н$							
$I_{дв}, A$							

Обмеження гальмівного струму по зчепленню для $I_3 < I_Г$ можуть бути побудовані по точкам перехрещення характеристик $B = f(v)$ з обмеженням по зчепленню $B_{зч} = f(v)$.

2.5.4. Обмеження гальмівного струму по комутації розраховується вихо-

дячи з умови

$$\frac{I_3}{I_{дв}} = 0,7. \quad (28)$$

Використовуючи струми збудження I_3 з табл. 2.5, за формулою (28) визначаються відповідні струми якоря ТЕД, а потім за формулою (21) – значення швидкості електровоза. Результати розрахунку заносяться до табл. 2.10.

Таблиця 2.10

I_3, A						
$C_v \Phi, B \cdot \Gamma / км$						
$I_{дв}, A$						
$v, км/Г$						
B_Γ, H						

Обмеження по комутації гальмівних характеристик електровоза будуються за точками перехрещення даного обмеження з характеристиками струму ТЕД в режимі рекуперативного гальмування.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- 1 Поясніть принцип автоматичного керування з від'ємним зворотним зв'язком.
- 2 Яким чином забезпечується стабілізація струму тягових електродвигунів в режимі тяги?
- 3 Яким чином забезпечується стабілізація струму тягових електродвигунів в режимі рекуперації?
- 4 Яким чином забезпечується стабілізація швидкості електровоза в режимі тяги?
- 5 Яким чином забезпечується стабілізація швидкості електровоза в режимі рекуперації?
- 6 Наведіть спрощену функціональну схему системи автоматичного керування електровоза в режимі тяги.
- 7 Наведіть спрощену функціональну схему системи автоматичного керування електровоза в режимі рекуперації.

8 Які задаючи елементи використовують в системах автоматичного керування електрорухомим складом?

9 Які чутливі елементи використовують в системах автоматичного керування електрорухомим складом?

10 Яку функцію виконує випрямно-інверторний перетворювач електро-воза в режимі тяги?

11 Яку функцію виконує випрямно-інверторний перетворювач електро-воза в режимі рекуперації?

12 За рахунок чого при фазо-імпульсному керуванні забезпечується регулювання напруги на тягових електродвигунах?

13 Що таке перекидання інвертора?

14 Що таке зовнішня характеристика випрямляча?

15 Що таке зовнішня характеристика інвертора?

16 Як зовнішня характеристика випрямляча впливає на характеристики тягових електродвигунів?

17 Що таке кут відпирання тиристора?

18 Для чого використовують зонне регулювання напруги на тягових електродвигунах?

19 Як розраховуються струмові характеристики тягового електродвигуна в режимі рекуперації?

20 Як розраховуються гальмівні характеристики електровоза в режимі рекуперації?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1 Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д. : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. –Т. 1. – 2014. – 578 с.

2 Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д. : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. –Т. 2. – 2014. – 490 с.

3 Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Навчальний посібник /Ю.П. Гоначров, М.В. Панасенко та ін. за ред. Ю.П. Гончарова. - Харків: НТУ "ХП", 2007. - 192 с.

4 Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Т., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. Перетворювальна техніка: Підручник / За реді В.С. Руденка - Харків: Фоліо, 2000. 4.2. - 360 с. 3. Безру

5 Силлові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін ; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.

6 Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навчальний посібник/М.М.Казачковський. - Дніпропетровськ: НГА України, 2000. - 197 с.

ДОДАТОК А

ПРИКЛАДИ ХАРАКТЕРИСТИК

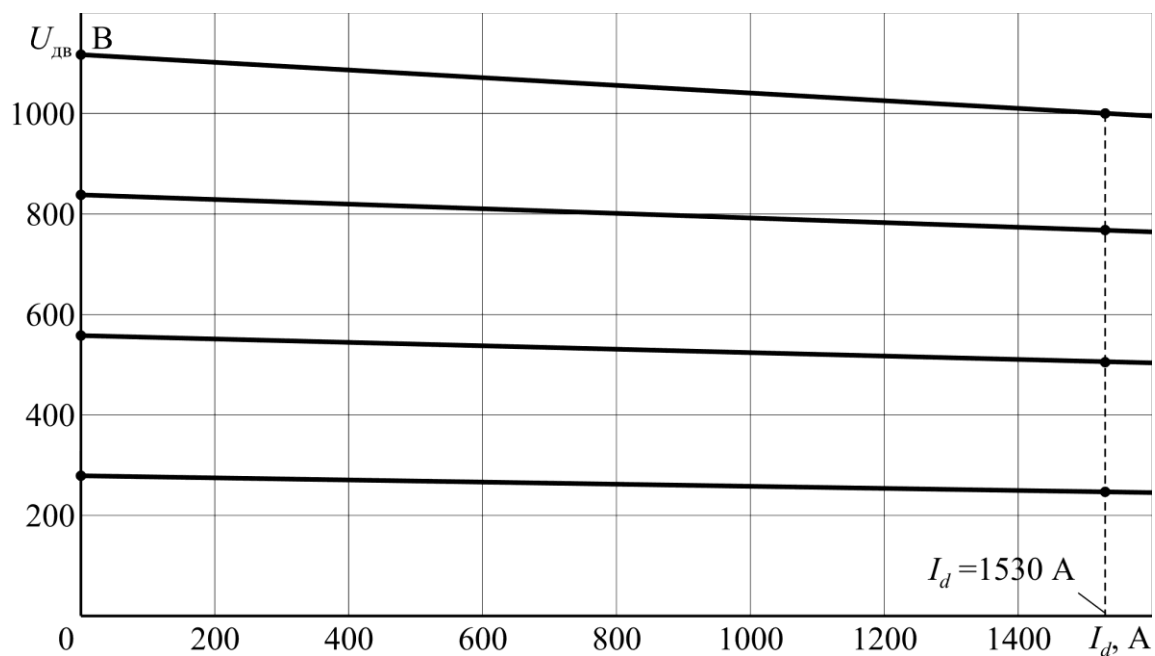


Рис. А.1. Зовнішня характеристика ВП в режимі випрямлення

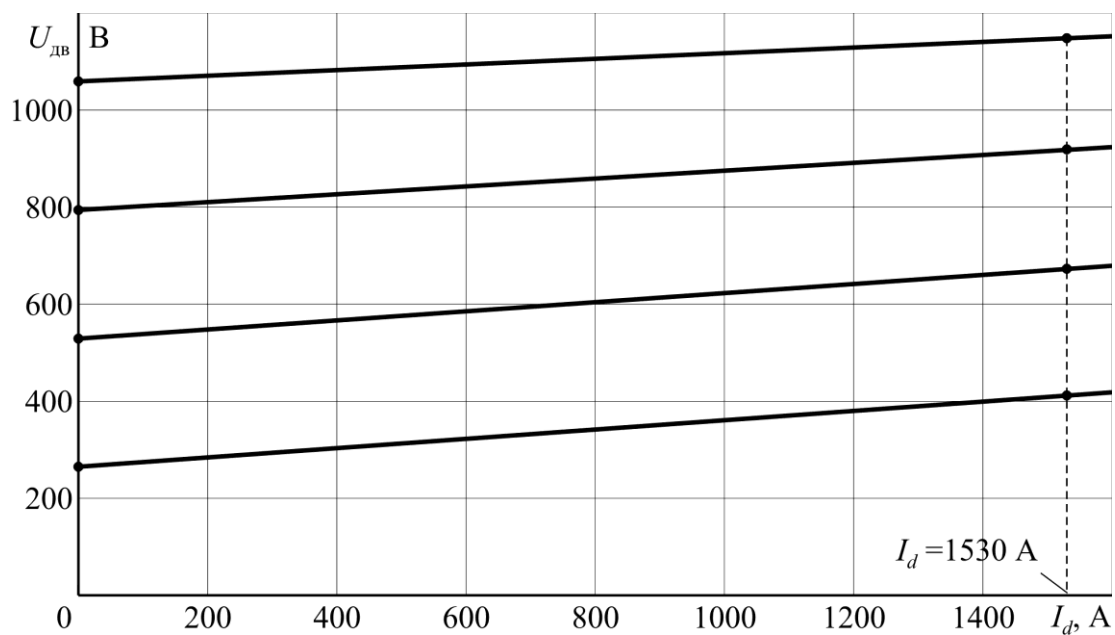


Рис. А.2. Зовнішня характеристика ВП в режимі інвертування

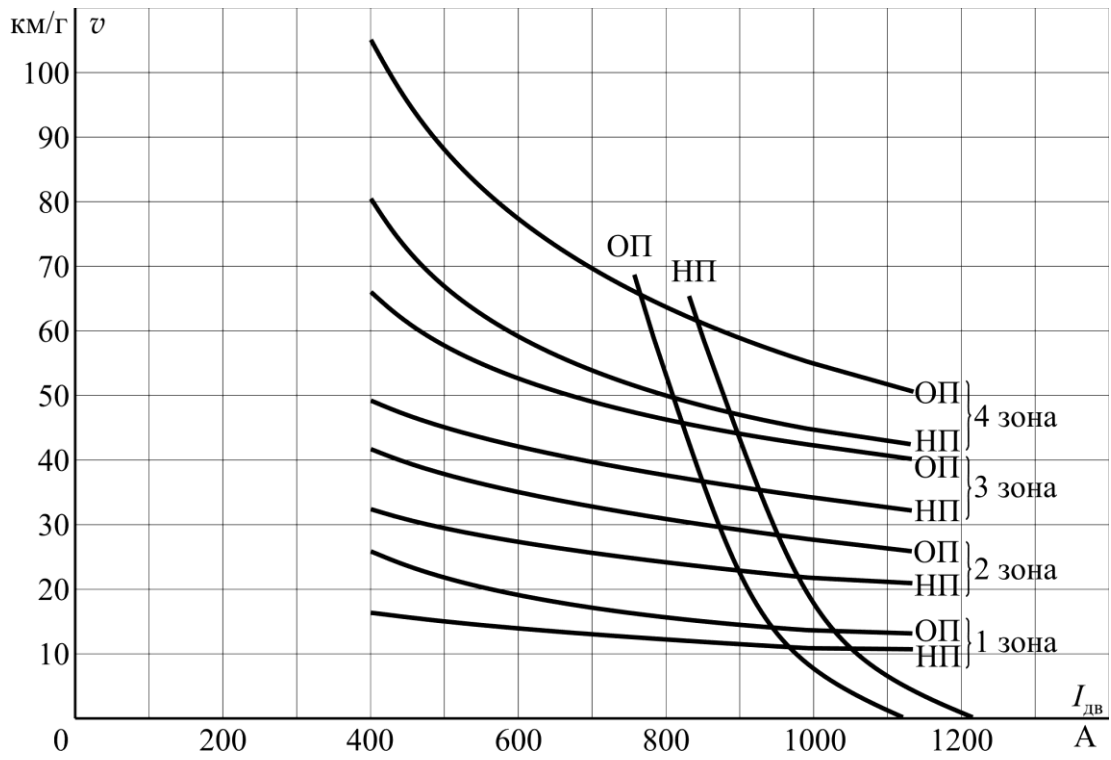


Рис. А.3. Швидкісні характеристики тягового електродвигуна

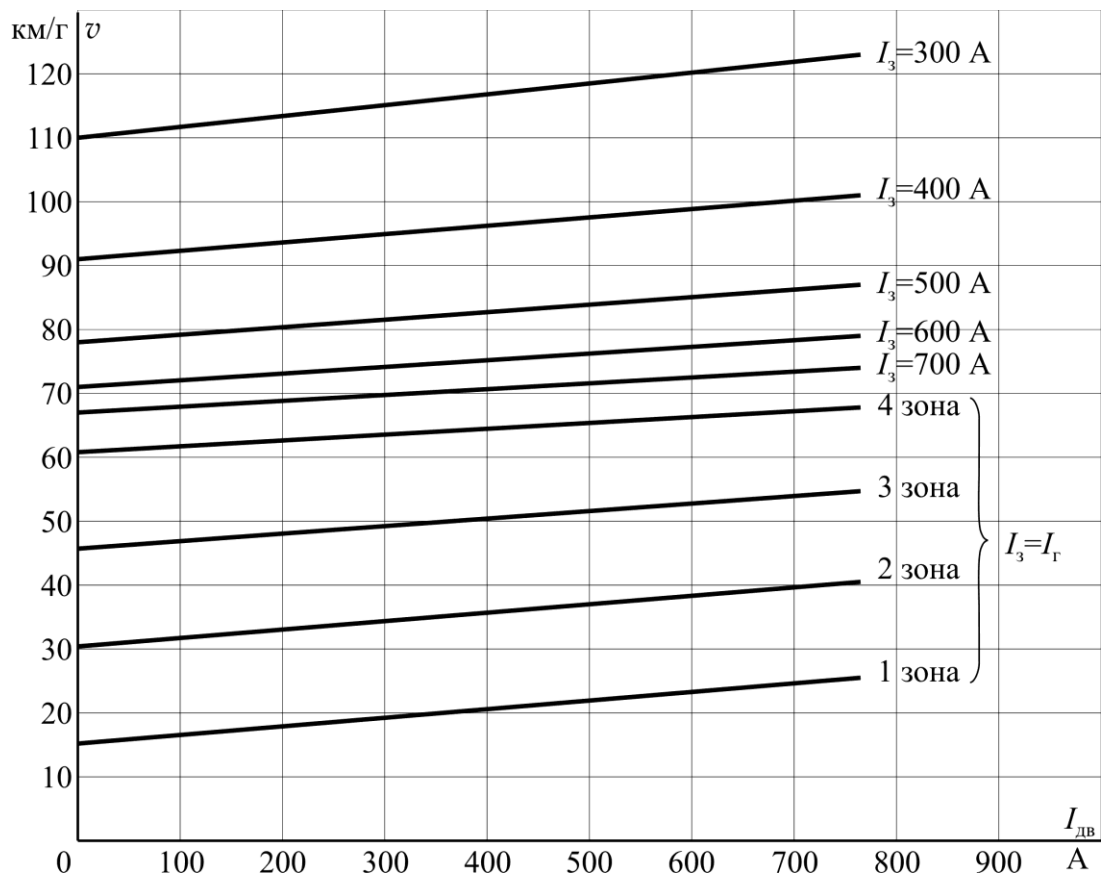


Рис. А.4. Струмові характеристики тягового електродвигуна

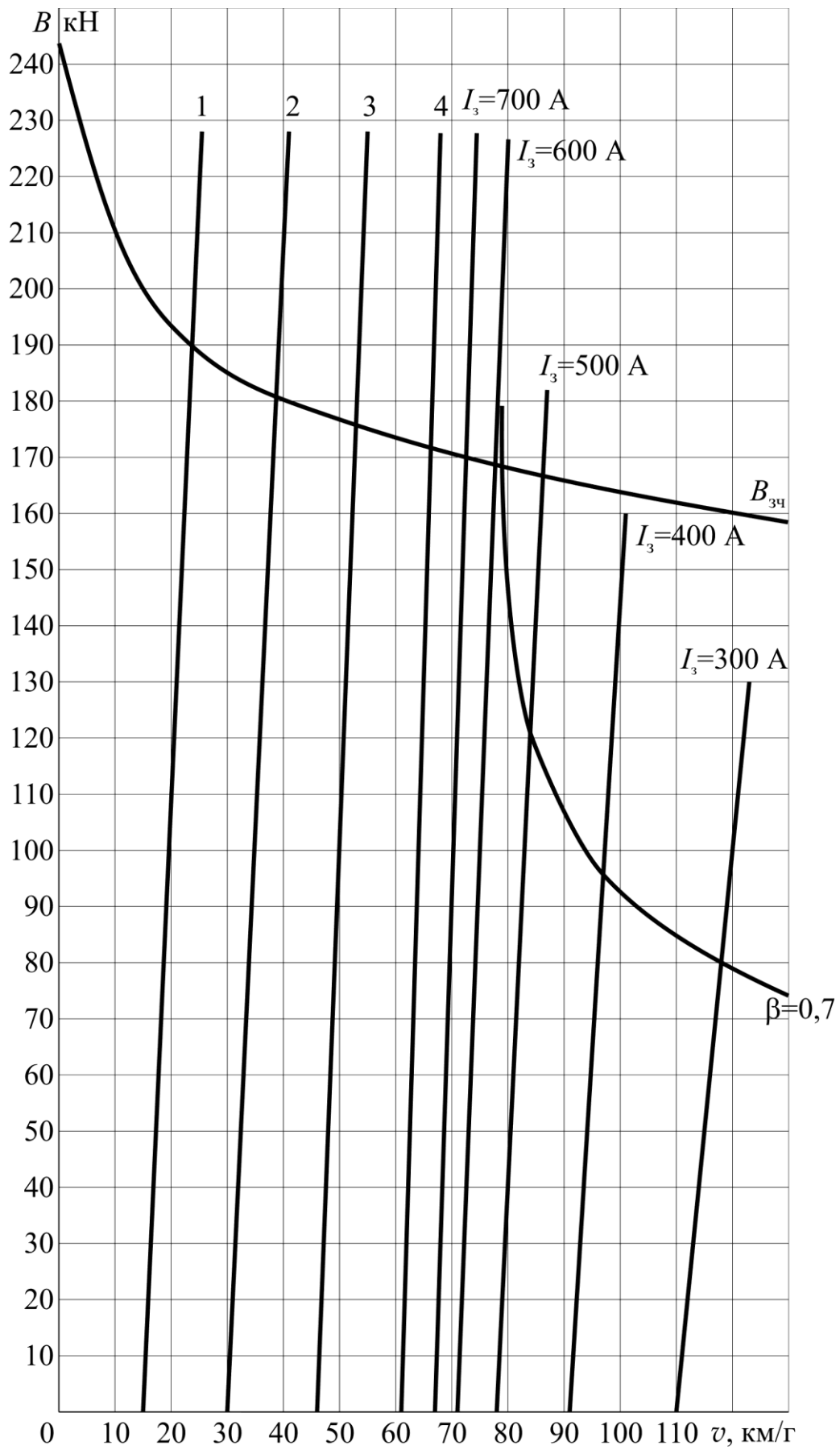


Рис. А.5. Гальмові характеристики електровоза

Навчально-методичне видання

**Афанасов Андрій Михайлович,
Арпуль Сергій Вікторович,
Шаповалов Олександр Сергійович**

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Навчально-методичні рекомендації до контрольного завдання

Електронне видання

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.863 від 15.04.2026)

Комп'ютерна верстка

Формат 60x84 ^{1/16}. Ум. друк. арк. 1,50. Обл.-вид. арк. 1,52.
Зам. № 43

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2. Дніпро, 49010