

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Аналіз шляхів підвищення електроенергетичної ефективності режимів
роботи електромеханічної системи електрифікованого рейкового
транспорту**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-23ск

Богдан ПАВЛОВ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПАВЛОВ Богдан Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз шляхів підвищення електроенергетичної ефективності
режимів роботи електромеханічної системи електрифікованого рейкового
транспорту

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз шляхів
підвищення електроенергетичної ефективності режимів роботи
електромеханічної системи електрифікованого рейкового транспорту
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Колекторні двигуни; II. Електричне гальмування колекторних двигунів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Характеристики крутного моменту; II. Реостатне гальмування;
III. Рекуперативне гальмування; IV. Розгін при максимальному тяговому
зусиллі; V. Приклад реостату з контакторами; VI. Втрати у пусковому
реостаті.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристики крутного моменту	21.05.26
2	Реостатне гальмування	27.05.26
3	Рекуперативне гальмування	29.05.26
4	Послідовність кроків послідовно-паралельного	02.06.26
5	Розгін при максимальному тяговому зусиллі	07.06.26
6	Приклад градуатора постійного струму	11.06.26
7	Приклад реостату з контакторами	14.06.26
8	Втрати у пусковому реостаті	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Богдан ПАВЛОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Аналіз шляхів підвищення електроенергетичної ефективності режимів роботи електромеханічної системи електрифікованого рейкового транспорту»

44 с., 14 рис., 20 літературних джерел

Мета роботи: Зниження питомих витрат електроенергії на тягу поїздів та підвищення загального коефіцієнта корисної дії електромеханічних комплексів шляхом оптимізації режимів керування, впровадження систем рекуперації та інтеграції накопичувачів енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати структуру та джерела втрат електроенергії в існуючих тягових електромеханічних системах під час пуску, вибігу та гальмування рухомого складу.

Дослідити проблематику неефективного використання енергії рекуперації в умовах низької приймальної здатності тягової мережі.

Обґрунтувати доцільність застосування бортових або стаціонарних накопичувачів енергії (суперконденсаторів, літій-іонних батарей, маховиків) для згладжування пікових навантажень.

Розробити енергооптимальні алгоритми керування рухом поїзда (оптимізація траєкторії швидкості та профілю тяги залежно від розкладу та рельєфу колії).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Провести техніко-економічну оцінку ефективності запропонованих рішень для реальних умов експлуатації міського або магістрального транспорту.

ЕЛЕКТРИФІКОВАНИЙ РЕЙКОВИЙ ТРАНСПОРТ,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА,
РЕКУПЕРАТИВНЕ ГАЛЬМУВАННЯ, НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, ТЯГОВА
ПІДСТАНЦІЯ, СМАРТ-МЕРЕЖІ, ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Колекторні двигуни	12
Розділ 2. Електричне гальмування колекторних двигунів	16
Висновки	27
Список використаних джерел	28
Додаток А.....	31
Додаток Б	32
Додаток В	33
Додаток Г	34
Додаток Д.....	35
Додаток Е	36
Додаток Ж	37
Додаток З.....	38
Додаток І	39
Додаток К.....	40
Додаток Л.....	41
Додаток М	42
Додаток Н.....	43
Додаток О.....	44

Вступ

Актуальність та проблематика

Електрифікований рейковий транспорт (магістральні залізниці, метрополітен, міський трамвай) є одним із найпотужніших та найбільш енергоємних споживачів у структурі економіки.

В умовах постійного зростання вартості електроенергії та глобального курсу на декарбонізацію, зниження питомих витрат енергії на тягу поїздів стає не просто технічним завданням, а питанням економічного виживання транспортних компаній.

Головна проблема сучасного рейкового транспорту полягає в тому, що значна частина існуючої тягової інфраструктури та рухомого складу проектувалася кілька десятиліть тому.

Тоді пріоритетом була простота рішень і надійність, а не енергозбереження.

Як наслідок, величезна кількість кінетичної енергії поїзда під час гальмування просто розсіюється у вигляді тепла на гальмівних резисторах або механічних колодках, що не лише є прямим марнотратством, але й призводить до додаткових витрат на охолодження (особливо в тунелях метрополітену).

Навіть якщо електропоїзд оснащений системою рекуперації (повернення енергії в мережу), часто виникає ситуація, коли на тій самій ділянці немає іншого поїзда, готового цю енергію спожити.

У такому разі напруга в контактній мережі різко зростає, і система автоматики змушена відключати рекуперацію, переходячи на неефективне реостатне або пневматичне гальмування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливості режимів роботи тягових систем

Електромеханічна система поїзда працює у вкрай динамічному, циклічному режимі, що складається з чотирьох основних фаз:

1. **Розгін (пуск):** Споживається колосальна пікова потужність, що викликає просідання напруги на тягових підстанціях та перевантаження кабельних ліній.
2. **Рух із сталою швидкістю:** Споживання енергії є помірним і йде переважно на подолання аеродинамічного опору та тертя.
3. **Вибіг (рух за інерцією):** Двигуни відключені, енергія не споживається (окрім власних потреб вагонів). Це найбільш енергоефективний режим.
4. **Гальмування:** Двигуни переходять у генераторний режим, перетворюючи кінетичну масу поїзда назад на електроенергію.

Особливість полягає в тому, що енергоефективність усієї поїздки критично залежить від майстерності управління цими циклами: чим довше поїзд іде на вибігу і чим більше енергії віддає при гальмуванні, тим вищий загальний ККД.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практична реалізація: шляхи підвищення енергоефективності

Для комплексного вирішення проблеми енергоефективності у світовій практиці застосовують такі технічні та програмні рішення:

Напрямок модернізації	Суть технічного рішення	Практичний ефект
Системи накопичення енергії (ESS)	Встановлення суперконденсаторів або батарей на борту поїзда або на тягових підстанціях. Накопичувач миттєво "вбирає" енергію гальмування і віддає її під час наступного розгону.	Збереження до 25-30% енергії, яка раніше втрачалася. Згладжування піків навантаження на підстанції. Дозволяє рух на автономному ході.
Реверсивні тягові підстанції	Оснащення підстанцій інверторами (активними випрямлячами), що дозволяють передавати надлишок енергії з контактної мережі назад у міську або промислову енергосистему.	Вирішує проблему "неприйнятною мережі". Гарантовано утилізує 100% енергії рекуперації незалежно від графіка інших поїздів.

Модернізація тягового приводу	Перехід від двигунів постійного струму з контакторним керуванням на асинхронні або синхронні двигуни на постійних магнітах із транзисторними (IGBT/SiC) перетворювачами.	Підвищення електромагнітного ККД приводу на 10-15%, усунення втрат на пускових опорах, точність керування моментом.
Автоматизоване ведення поїзда (ATO/DAS)	Впровадження інтелектуальних систем автоведення або підказок машиністу (Driver Advisory System), що алгоритмічно розраховують ідеальний момент для початку вибігу та гальмування.	Оптимізація кінематичної траєкторії знижує витрати енергії на 10-20% лише за рахунок правильного стилю водіння без зміни конструкції поїзда.

Отже, підвищення електроенергоефективності рейкового транспорту потребує системного підходу.

Воно не обмежується лише вдосконаленням самого двигуна, а вимагає створення так званої "розумної тягової мережі" (Smart Traction Grid), де рухомий склад, інфраструктура живлення та системи диспетчеризації працюють як єдиний енергетичний організм.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Колекторні двигуни

Колекторний двигун, або двигун постійного струму гарантував розвиток електротяги від витоків до недавнього минулого: кінця XX століття.

Живлення від контактної мережі постійного струму, його робоча точка регулюється реостатом $R_{зм}$, що впливає на напругу, і шунтом $R_{ш}$, що впливає на збудження, зі змінним омичним опором.

Порушення, як правило, послідовно з якорем.

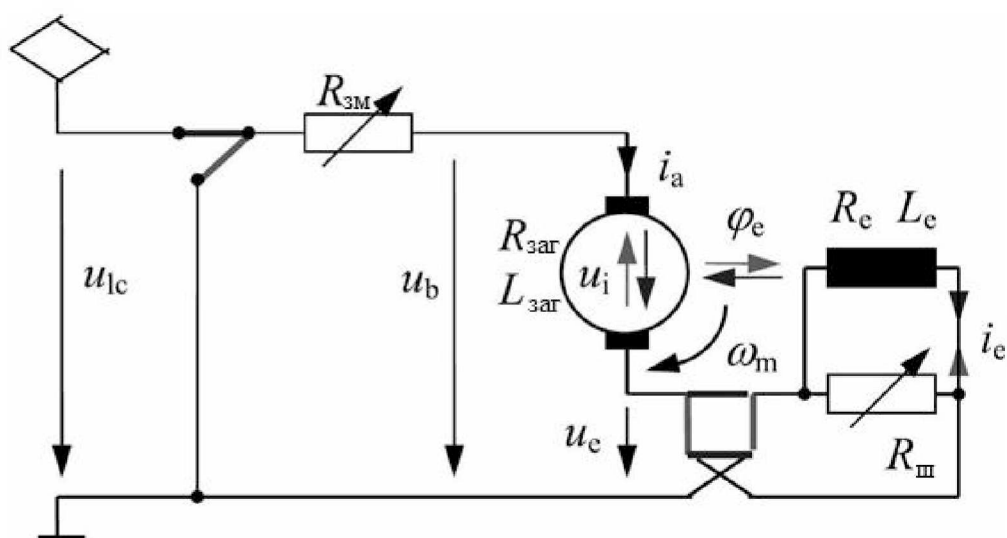


Рис. 1. Двигун постійного струму: реостатне гальмування із послідовним збудженням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1			Літ.	Лист	Листів
Розробив	Павлов Б.П.									
Перевірив	Сінчук І.О.									
Реценз.								КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук І.О.									
Затвердив	Пересунько І.І.									

Внутрішні рівняння записані нижче, не враховуючи індуктивності розсіювання двигуна.

Постійна двигуна C_m, N_p - дорівнює числу витків на полюс і p - числу пар полюсів.

Повний потік дорівнює Ψ_e , а потік через зазор ϕ_e .

$$\Psi_e = 2pN_p\phi_e \quad (1)$$

$$u_i = C_m\phi_e\omega_m \quad (2)$$

$$M_m = C_m\phi_e i_a \quad (3)$$

Динамічне рівняння показує залежність моменту інерції двигуна (власного та набутого) J — від зовнішнього крутного моменту M_{ex} .

Швидкість обертання дорівнює ω_m .

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (M_m - M_{ex}) \quad (4)$$

У зчепленні можна записати рівняння електричної мережі.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_{tot}} (u_{lc} - R_{rh}i_a - R_{tot}i_a - u_i - R_{sh}(i_a - i_e)) \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_e}{dt} = R_{sh}i_a - (R_{sh} + R_e)i_e \quad (6)$$

У режимі гальмування необхідно встановити лише (5): u_{lc} він дорівнює нулю, а знак u_i має бути змінено.

Три контактори дозволяють вибрати режим зчеплення: тяговий (синій) або гальмування (червоний) в одному напрямку руху.

В іншому напрямку руху положення обох контакторів збудження змінюються місцями: гальмування (синій) та тяговий (червоний), але правило розташування контакторів з боку джерела живлення залишається незмінним

Можуть бути спроектовані характеристики різних значень омичного опору.

Оскільки число значень невелике, зміна робочої точки відбувається східчасто.

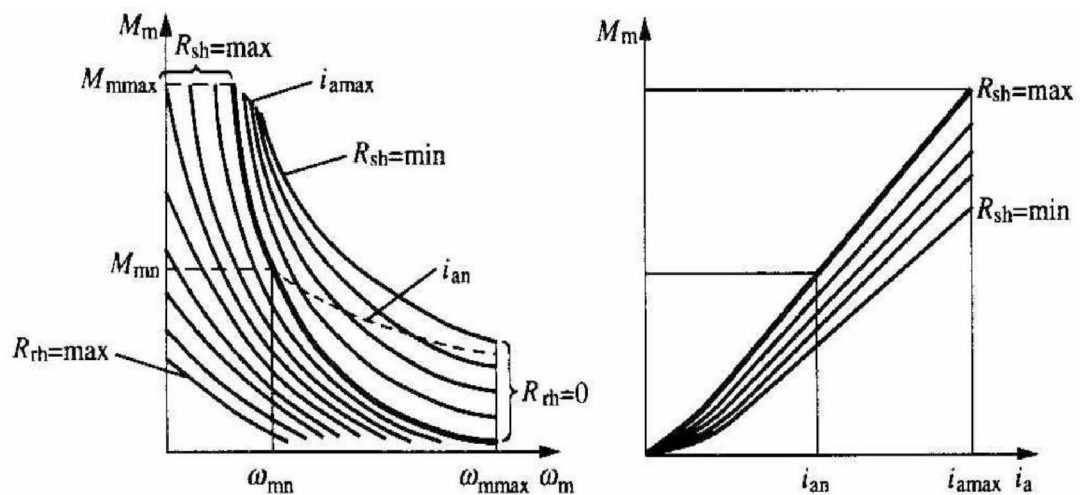


Рис. 2. Серія двигунів на тязі: характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.

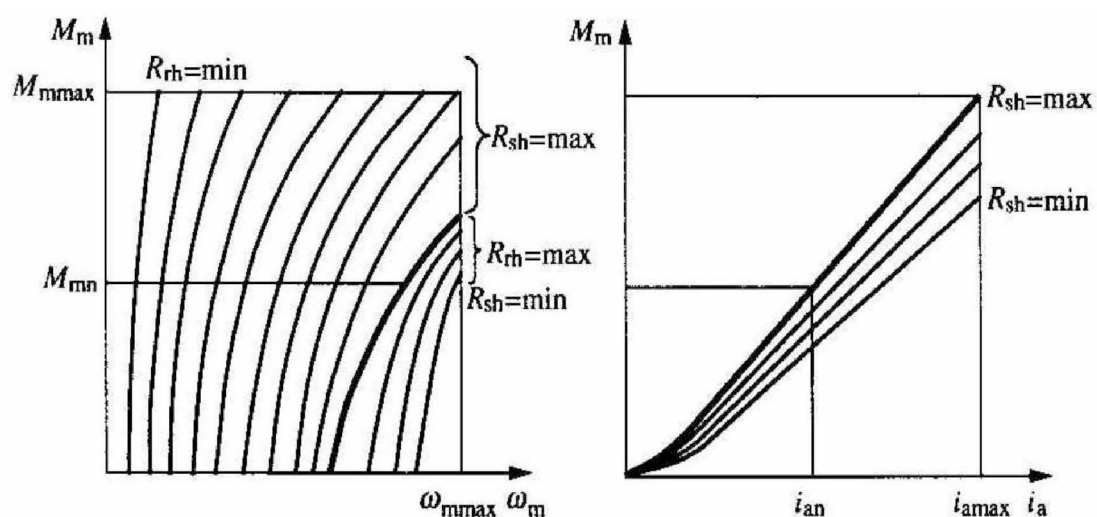


Рис. 3. Послідовний двигун при гальмуванні: характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.

Розділ 2. Електричне гальмування колекторних двигунів

При реостатному гальмуванні може бути вибрано незалежне збудження u_e , що подається від акумуляторної батареї (SNCF: CC 6500), або від генератора, що рухається двигуном, який живиться від контактної мережі (CFF: RAe TEE II).

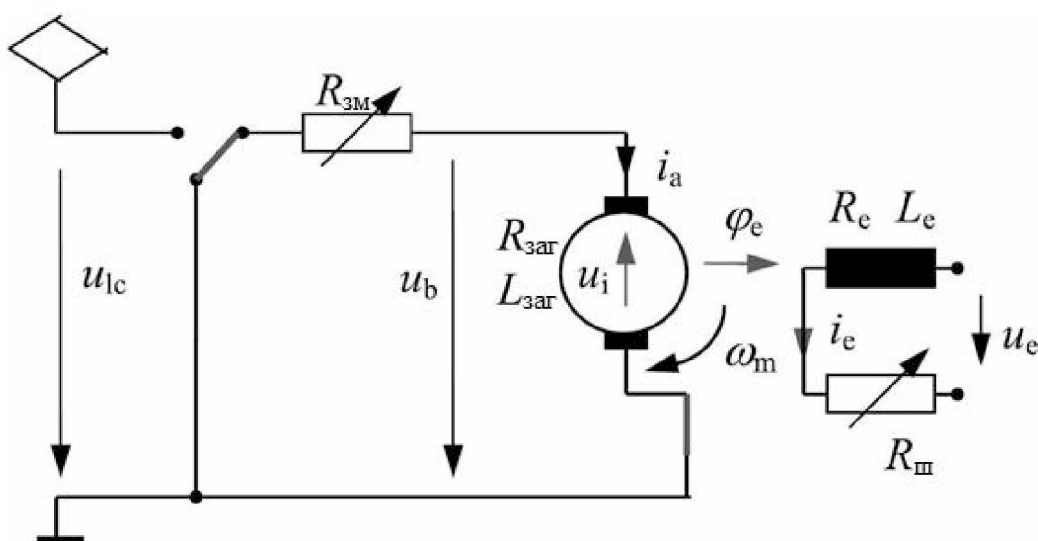


Рис. 4. Двигун постійного струму: реостатне гальмування із незалежним збудженням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2		
Розробив	Павлов Б.П.						
Перевірів	Сінчук І.О.						
Реценз.							
Н. Контр.	Сінчук І.О.						
Затвердив	Пересунько І.І.						
					Літ.	Лист	Листів
						16	11
					КНУ ЗЕЕМ-23ск		

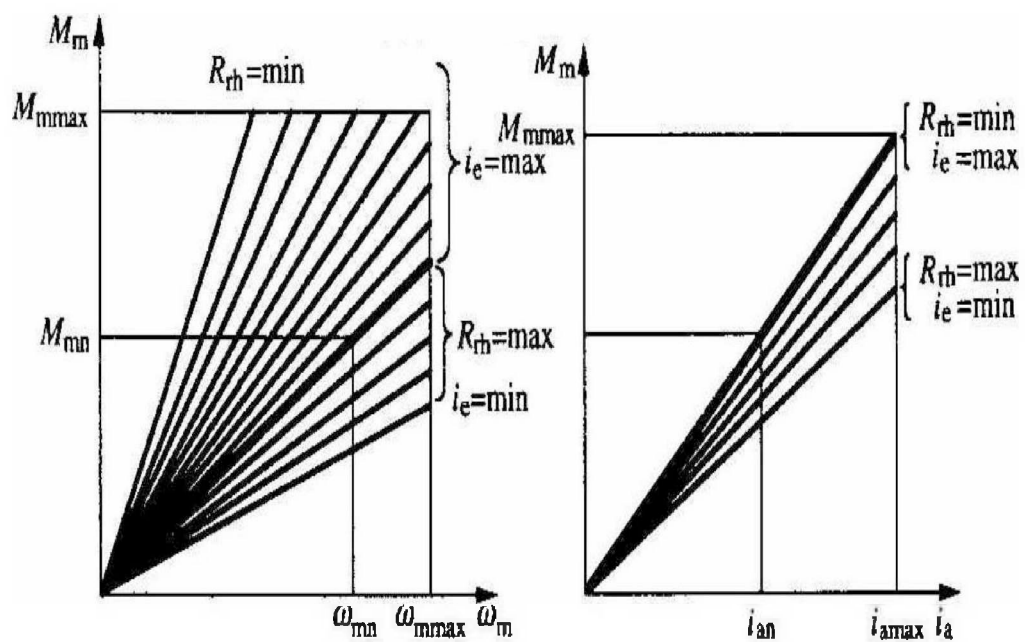


Рис. 5. Двигун постійного струму: реостатне гальмування із незалежним збудженням: характеристика моменту.

Замість того, щоб відбирати енергію гальмування (кінетичну чи потенційну) у резисторі, її можна подавати на контактну лінію: це рекуперативне гальмування.

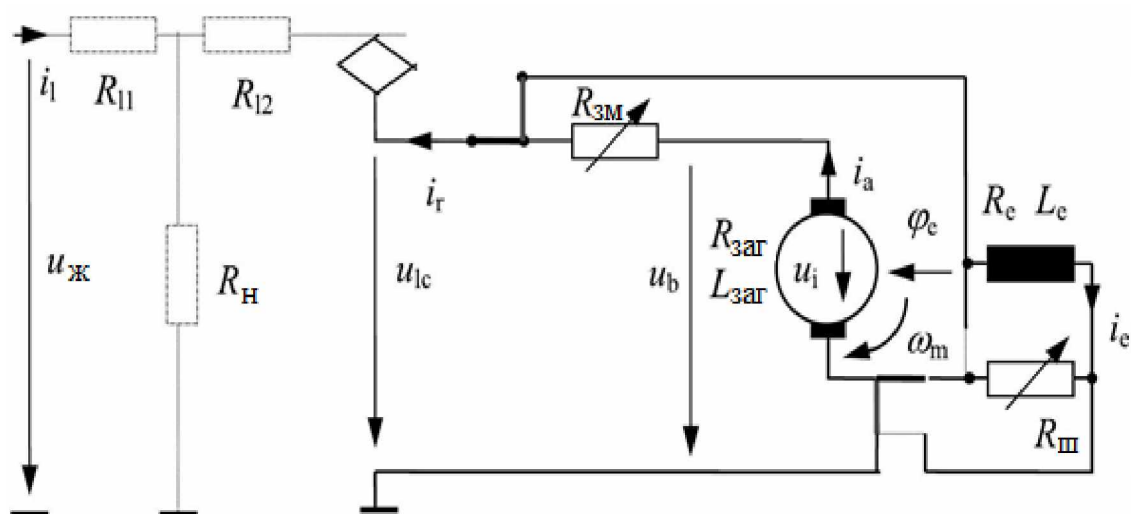


Рис. 6. Двигун постійного струму із незалежним збудженням: принцип рекуперативного гальмування.

У тяговому режимі червоні контактори розімкнуті, а сині пунктирні замкнуті.

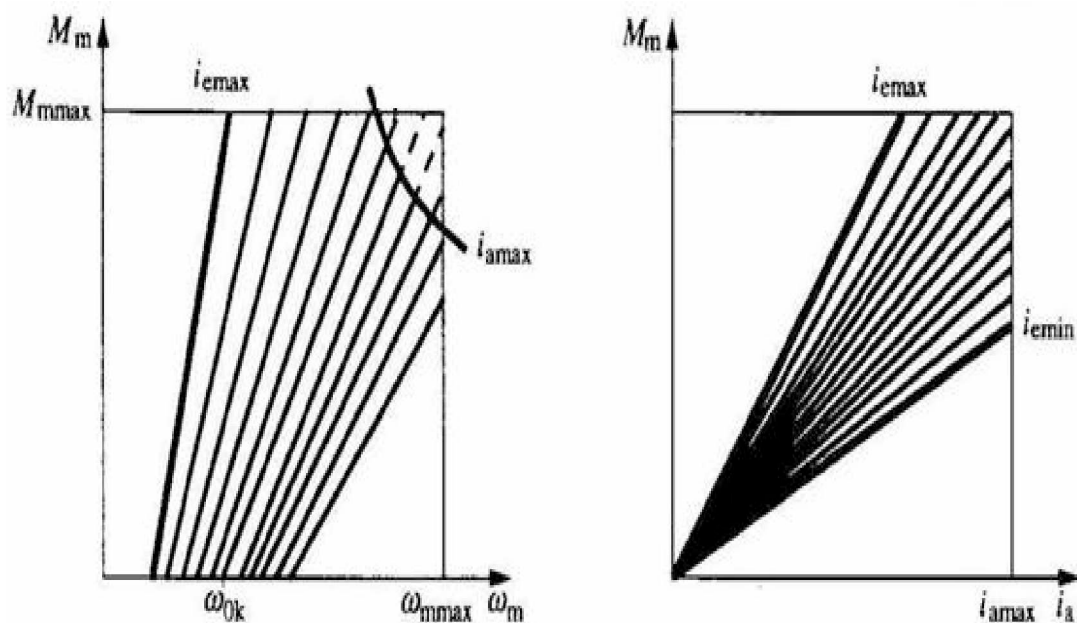


Рис. 7. Двигун постійного струму: рекуперативне гальмування з незалежним збудженням: характеристики крутного моменту.

Очевидно, що у всіх точках, де омичний опір реостату не дорівнює нулю, частина енергії контактної лінії втрачається у вигляді тепла в резисторі.

Для збільшення діапазону робочої точки, при якій реостат дорівнює нулю (ККД 100% пристроїв управління двигунами), встановлюються контактори, що дозволяють здійснювати послідовне або паралельне включення двигунів.

Можливе встановлення контакторів, що забезпечують перемикання з послідовного на паралельне включення без втрати тягового зусилля.

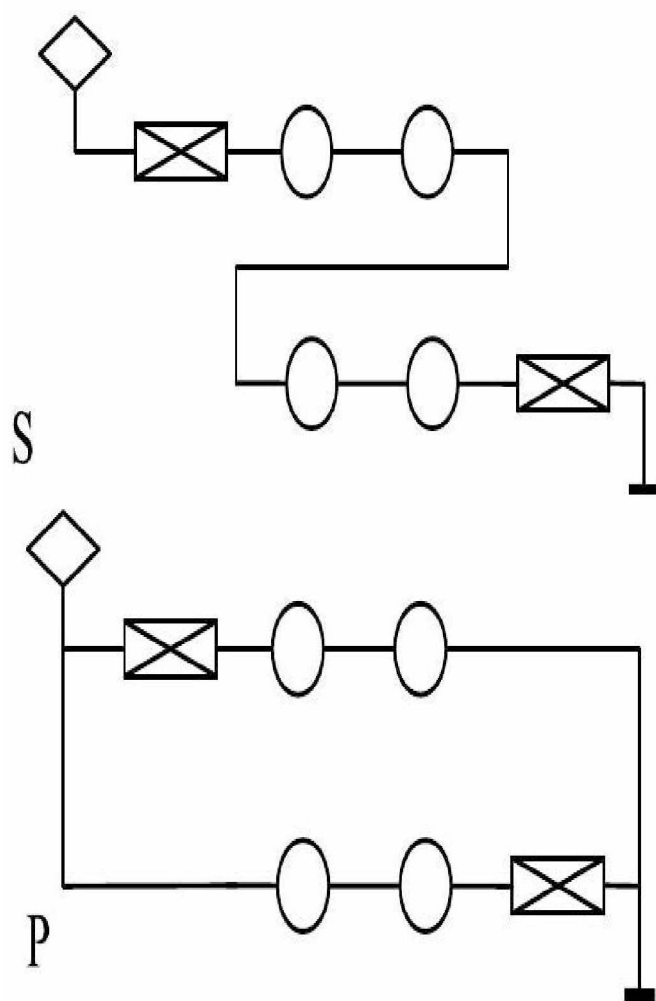


Рис. 8. Двигуни, які розташовані послідовно (*S*) або паралельно (*P*).

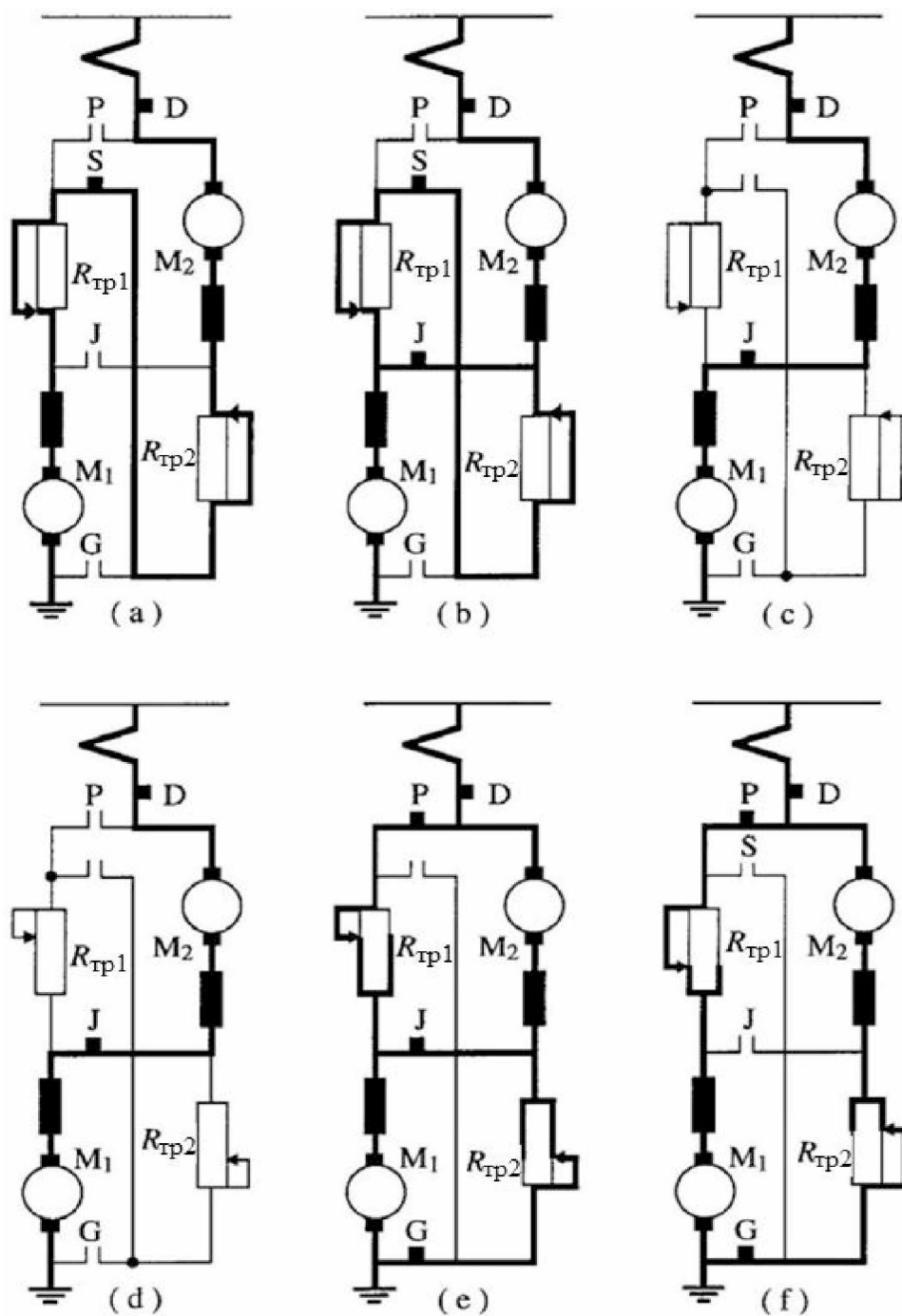


Рис. 9. Послідовність кроків послідовно-паралельного переходу з мостовим методом (BOB: ABeh 4/4 II).

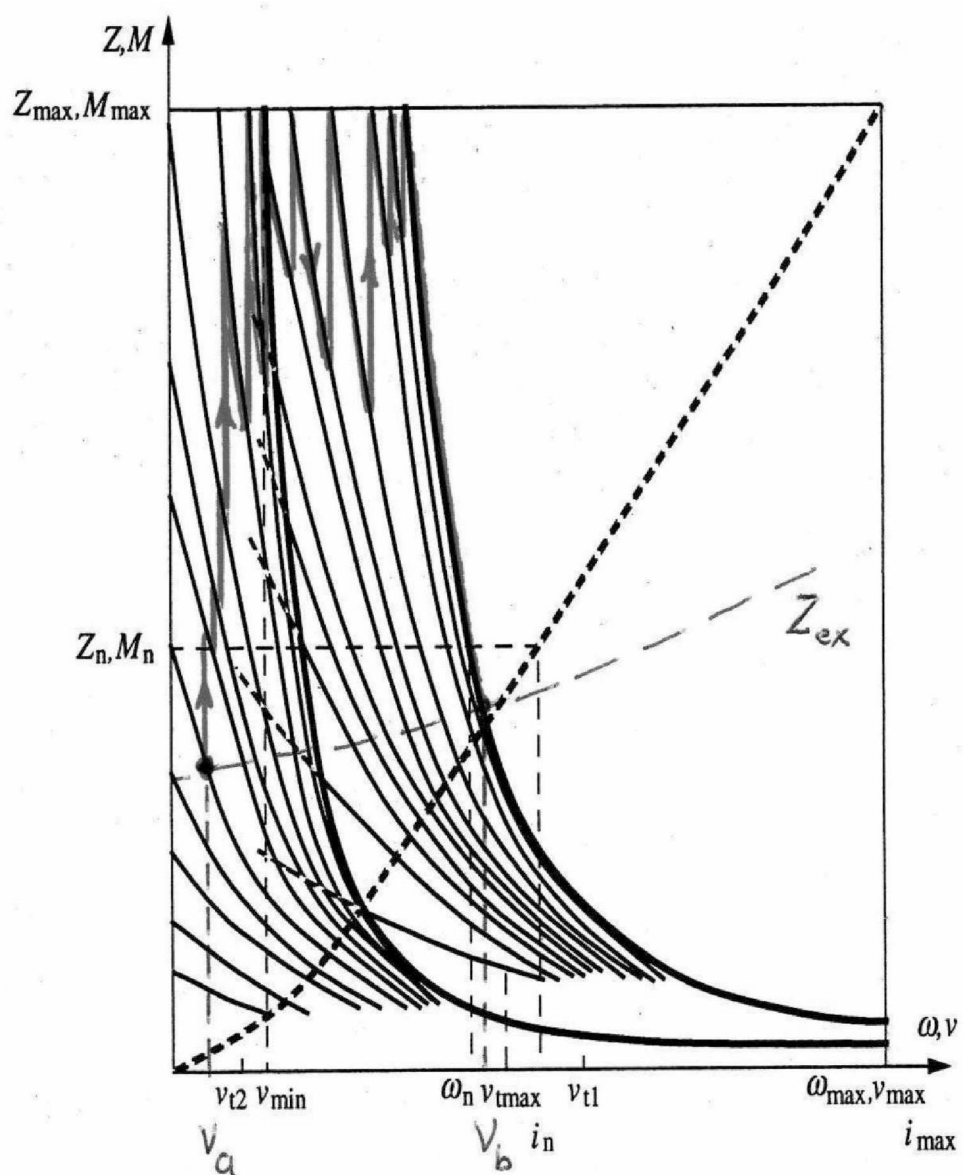


Рис. 10. Розгін від V_a до V_b при максимальному тяговому зусиллі: траєкторія робочих точок.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10

Арк.

22

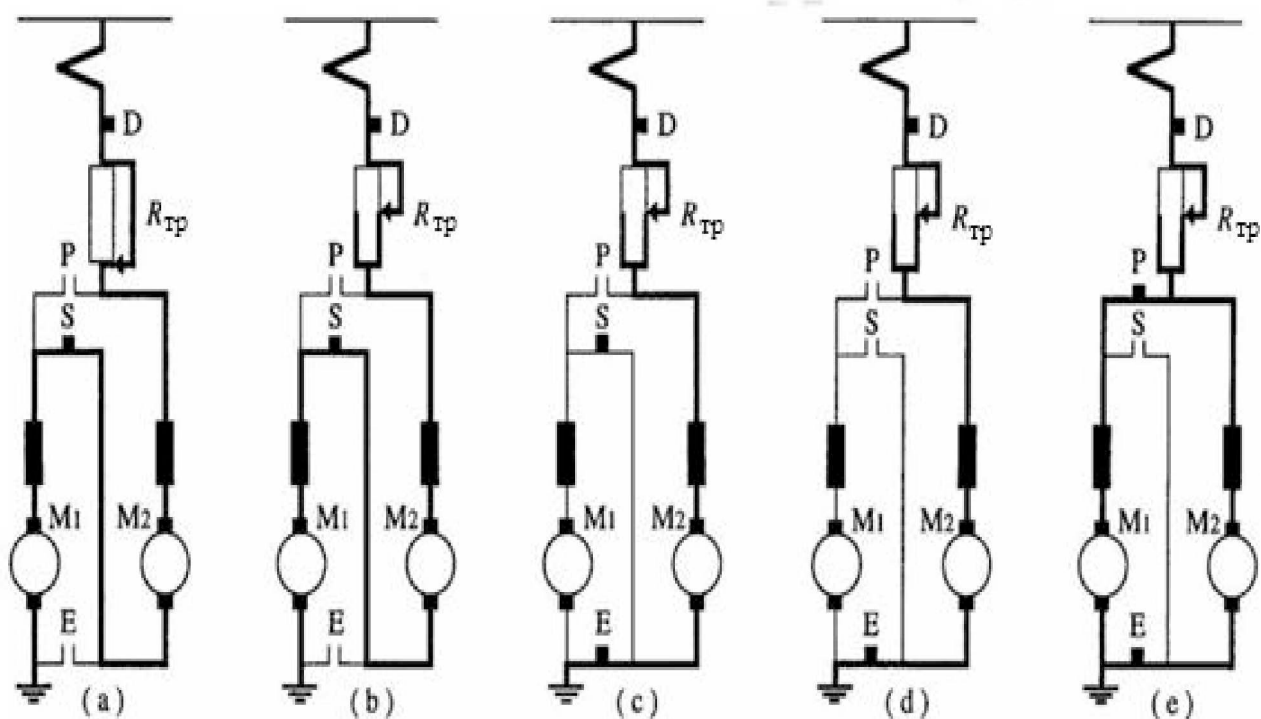


Рис. 11. Послідовність кроків під час переходу методом короткого замикання (RhB : ABe4/4).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10

Арк.

23

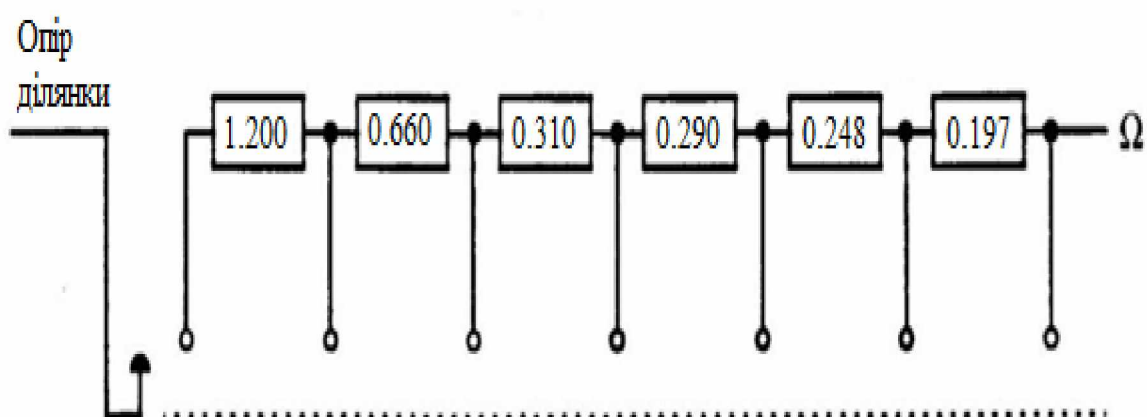


Рис. 12. Приклад градуатора постійного струму. (SNCF: Z2, реостат № 1).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

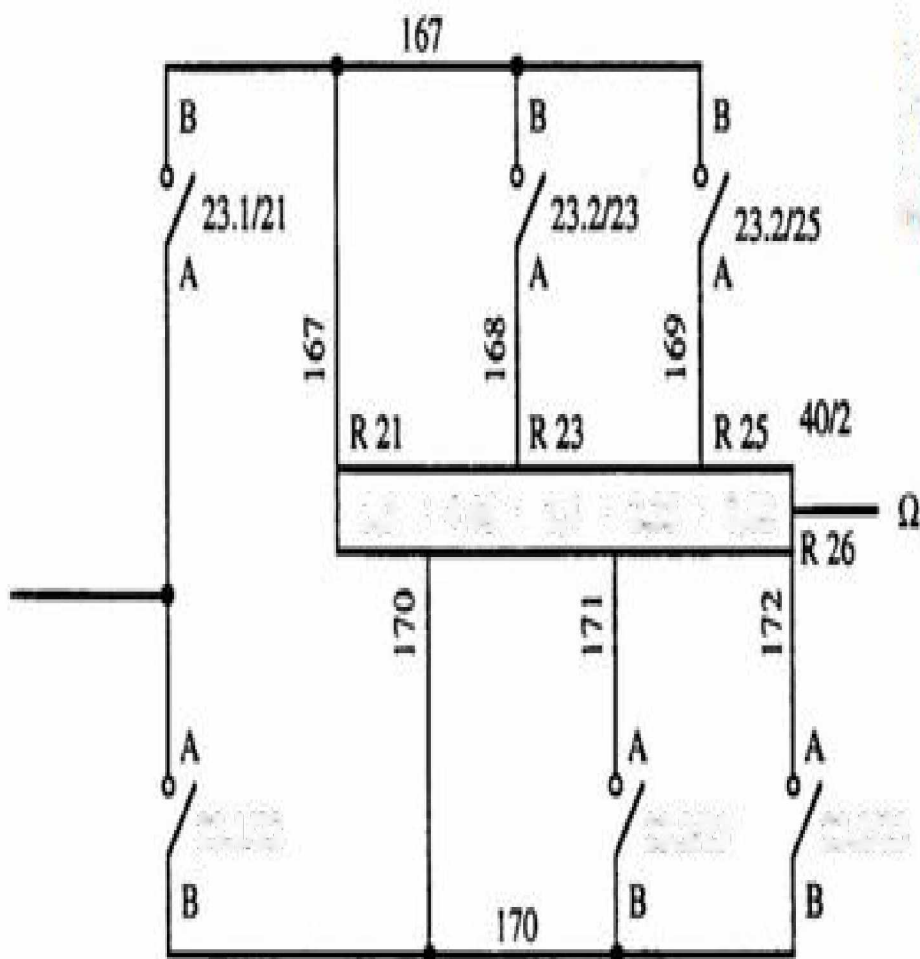


Рис. 13. Приклад реостату з контакторами. (ВОВ: АВех 4/4 III, реостат №2).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10

Арк.

25

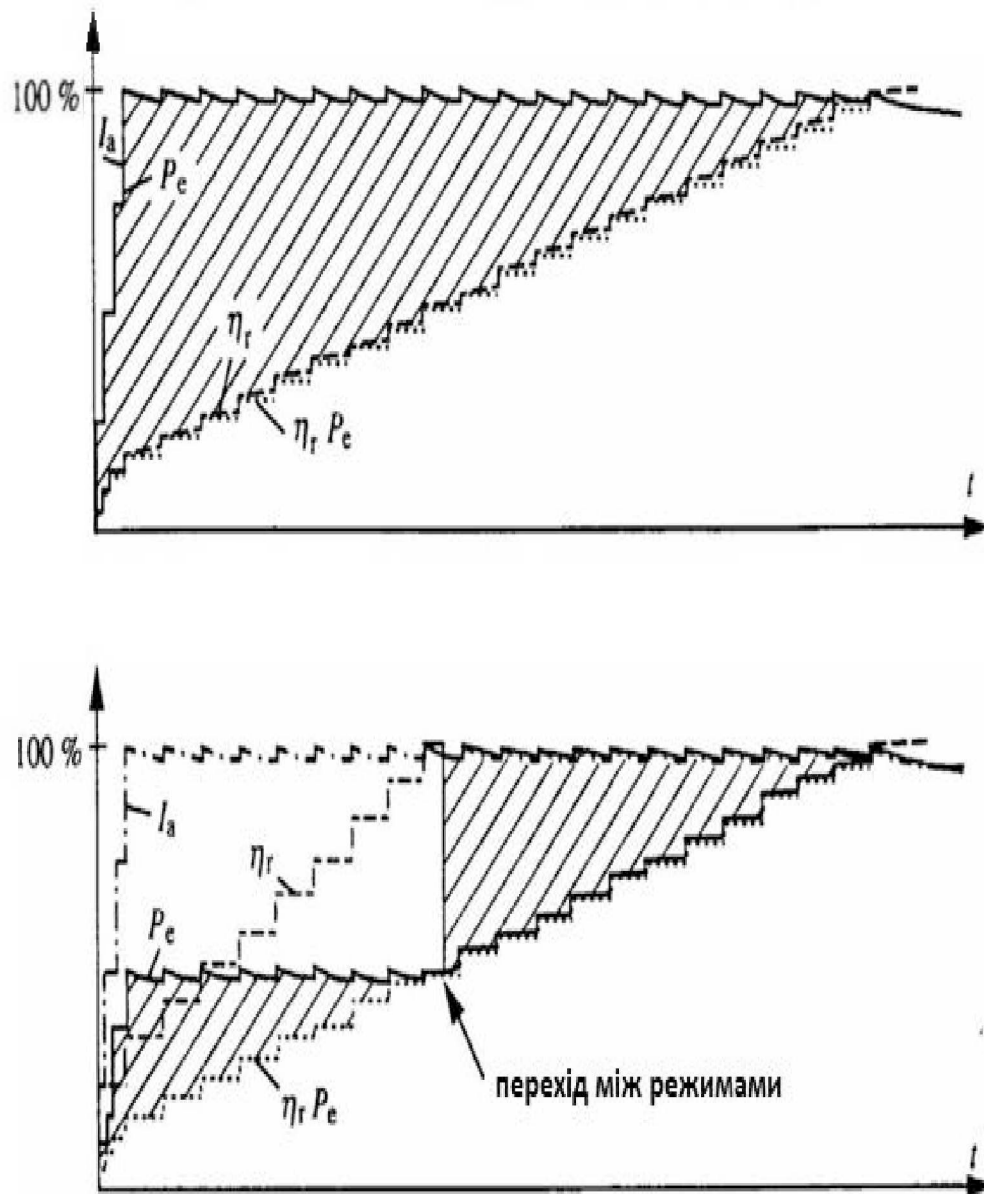


Рис. 14. Пуск поїзда: втрати у пусковому реостаті: одинарне сполучення (вгорі) та послідовно-паралельне (внизу)

Висновки

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати структуру та джерела втрат електроенергії в існуючих тягових електромеханічних системах під час пуску, вибігу та гальмування рухомого складу.

Дослідити проблематику неефективного використання енергії рекуперації в умовах низької приймальної здатності тягової мережі.

Обґрунтувати доцільність застосування бортових або стаціонарних накопичувачів енергії (суперконденсаторів, літій-іонних батарей, маховиків) для згладжування пікових навантажень.

Розробити енергооптимальні алгоритми керування рухом поїзда (оптимізація траєкторії швидкості та профілю тяги залежно від розкладу та рельєфу колії).

Провести техніко-економічну оцінку ефективності запропонованих рішень для реальних умов експлуатації міського або магістрального транспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Список використаних джерел

1. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
2. Vuchic, V. R. (2007). Urban Transit Systems and Technology. John Wiley & Sons.
3. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press.
4. Iwnicki, S., Spiryagin, M., Cole, C., & McSweeney, T. (Eds.). (2019). Handbook of Railway Vehicle Dynamics (2nd ed.). CRC Press.
5. Rochard, B. P., & Schmid, F. (2000). A review of methods to measure and calculate train resistances. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 214(4), 185-199.
6. Rufer, A. (2017). Energy Storage: Systems and Components. CRC Press.
7. González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., & Powell, J. P. (2013). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. Energy Conversion and Management, 71, 253-263.
8. Barrero, R., Tackoen, X., & Van Mierlo, J. (2008). Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 222(3), 227-239.
9. Lukaszewicz, P. (2001). Energy Consumption and Running Time for Trains (Doctoral dissertation, KTH, Stockholm).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

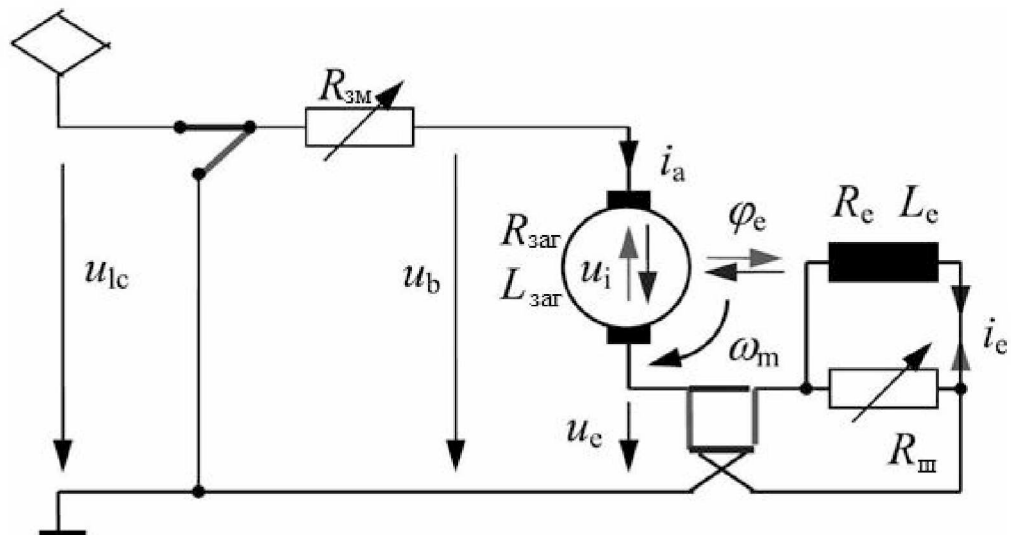
10. Hillmansen, S., & Roberts, C. (2007). Energy storage devices in hybrid railway vehicles: A kinematic analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 221(1), 135-143.
11. UIC (International Union of Railways). (2015). Energy Efficiency Technologies for Railways: UIC Leaflets and Standards. Paris: UIC.
12. Halmeaho, T., Rahkola, P., Kovanen, A., & Ruuskanen, V. (2015). Energy efficient train control. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16(5), 2374-2384.
13. Domínguez, M., Fernández-Cardador, A., Cucala, A. P., Gonsalves, T., & Pecharromán, R. R. (2011). Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 8(3), 396-404.
14. Brenna, M., Foiadelli, F., & Zaninelli, D. (2012). Energy costs analysis for traction systems with regenerative braking. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(6), 2415-2423.
15. Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(8), 2831-2847.
16. Arbolea, P., Diaz, G., & Coto, M. (2012). Unified AC/DC power flow for traction systems: A novel concept. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 35(1), 147-156.
17. Battistelli, L., & Fantauzzi, M. (2015). Reversible substations for modern traction networks. IET Electrical Systems in Transportation, 5(2), 70-76.
18. Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2012). Speed and energy control of DC traction systems fed by trackside supercapacitor storage. IEEE Transactions on Power Electronics, 27(11), 4473-4484.

19. EN 50591:2019. Railway Applications - Rolling Stock - Specification and verification of energy consumption. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).

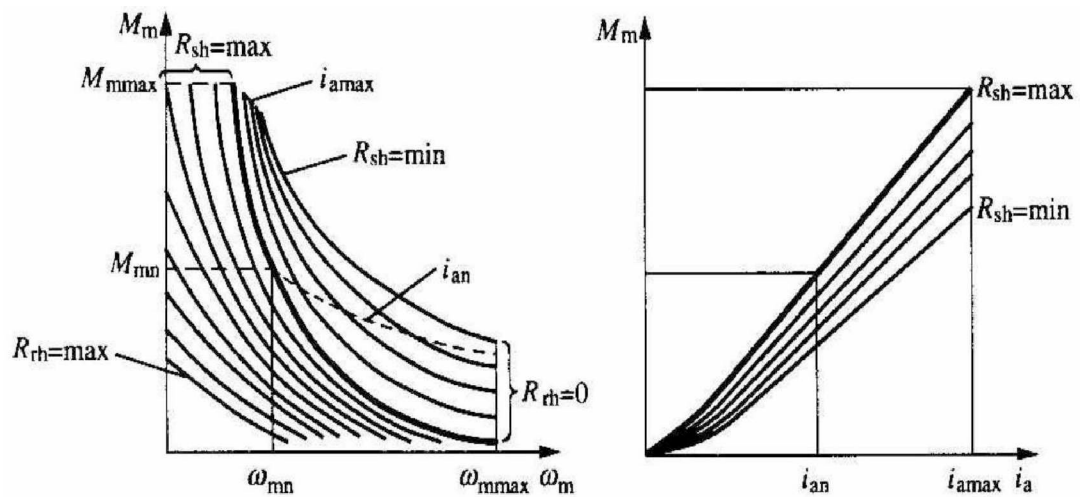
20. Synchuk, O. M., & Zachepa, N. V. (2018). Approaches to optimizing energy consumption in urban electric transport networks. Electrical Engineering & Electromechanics, (4), 58-63.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-10	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

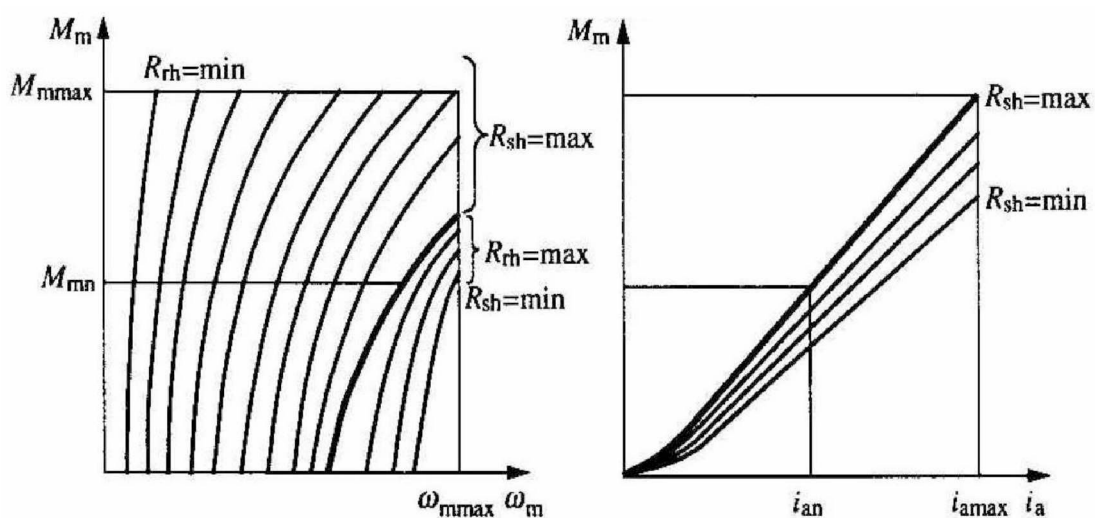
Двигун постійного струму: реостатне гальмування із послідовним збудженням.



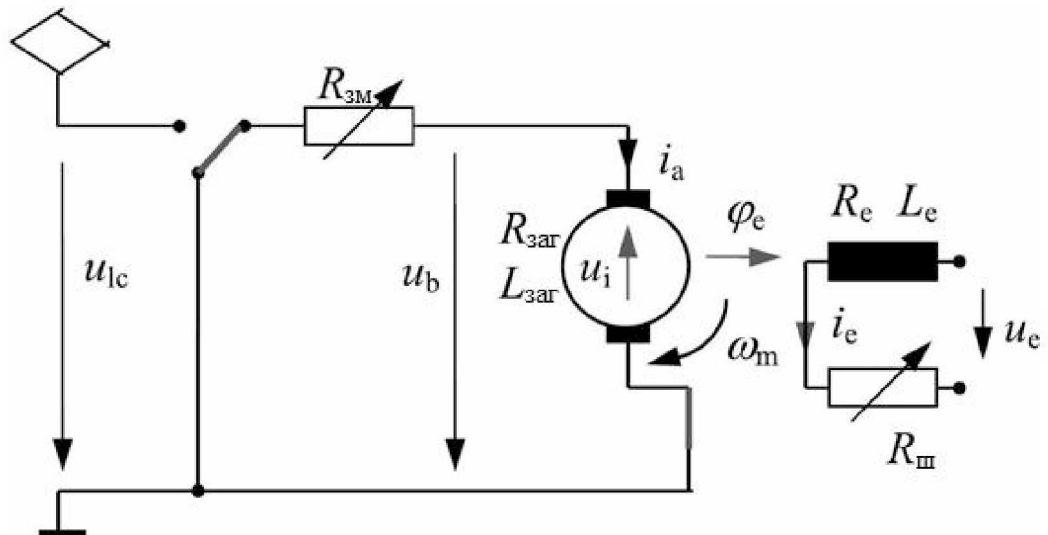
Серія двигунів на тязі: характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.



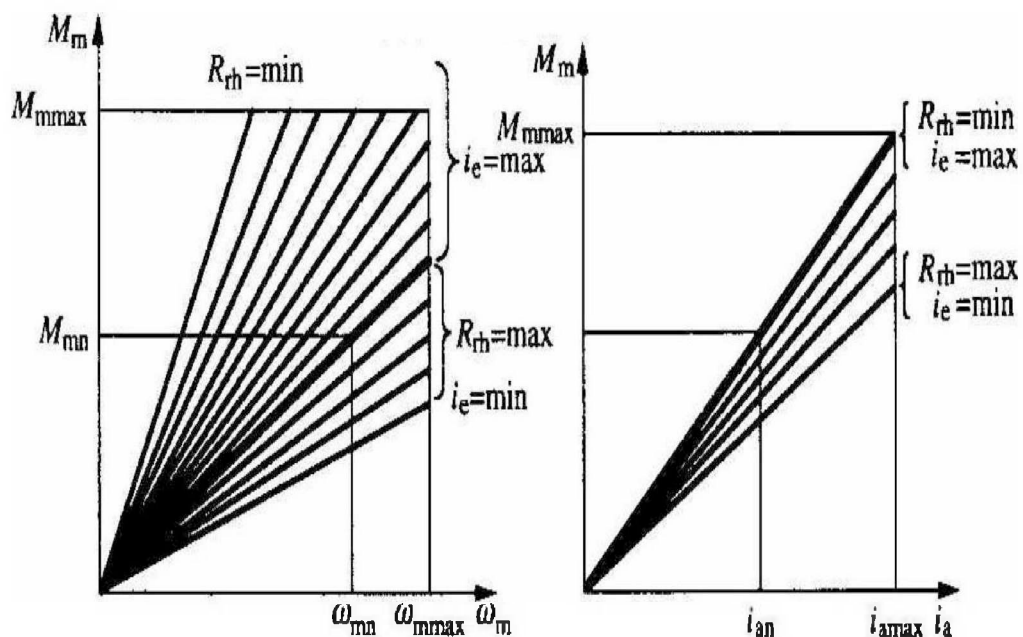
Послідовний двигун при гальмуванні: характеристики крутного моменту в залежності від струму та швидкості.



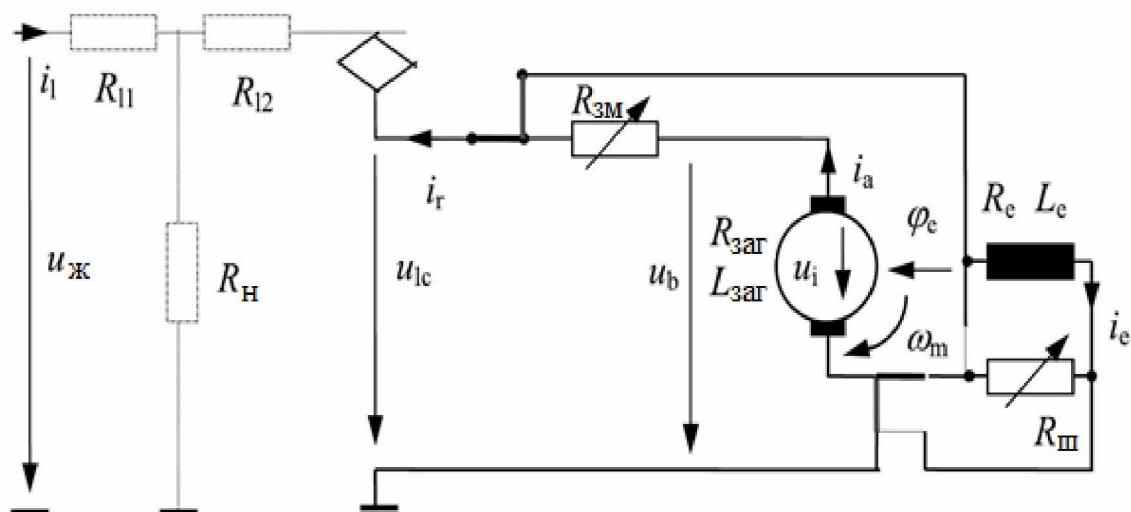
Двигун постійного струму: реостатне гальмування із незалежним збудженням.



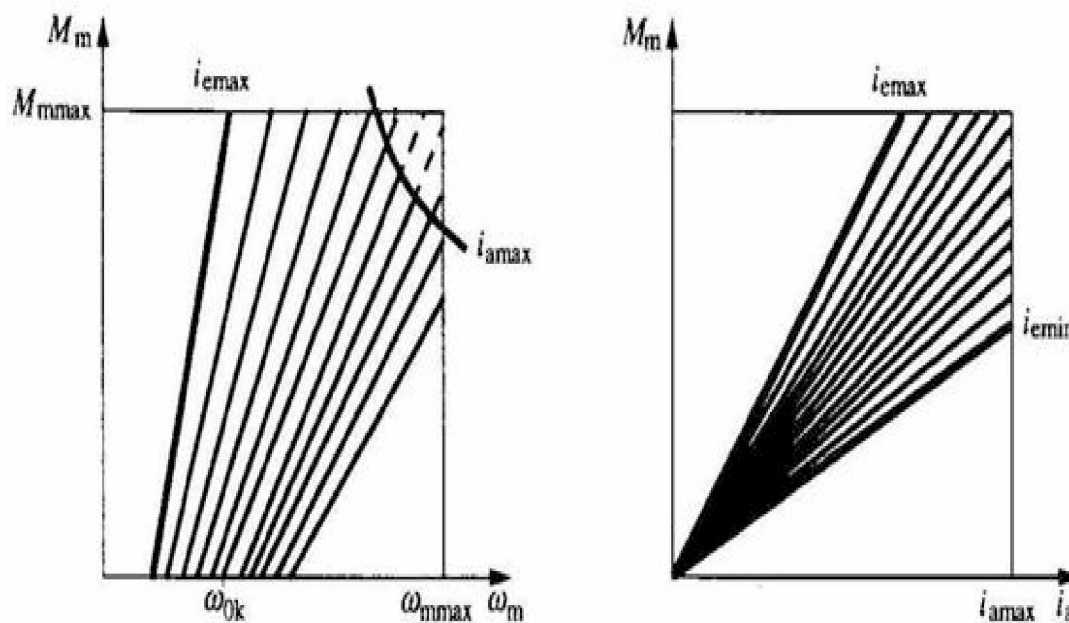
Двигун постійного струму: реостатне гальмування із незалежним збудженням: характеристика моменту.



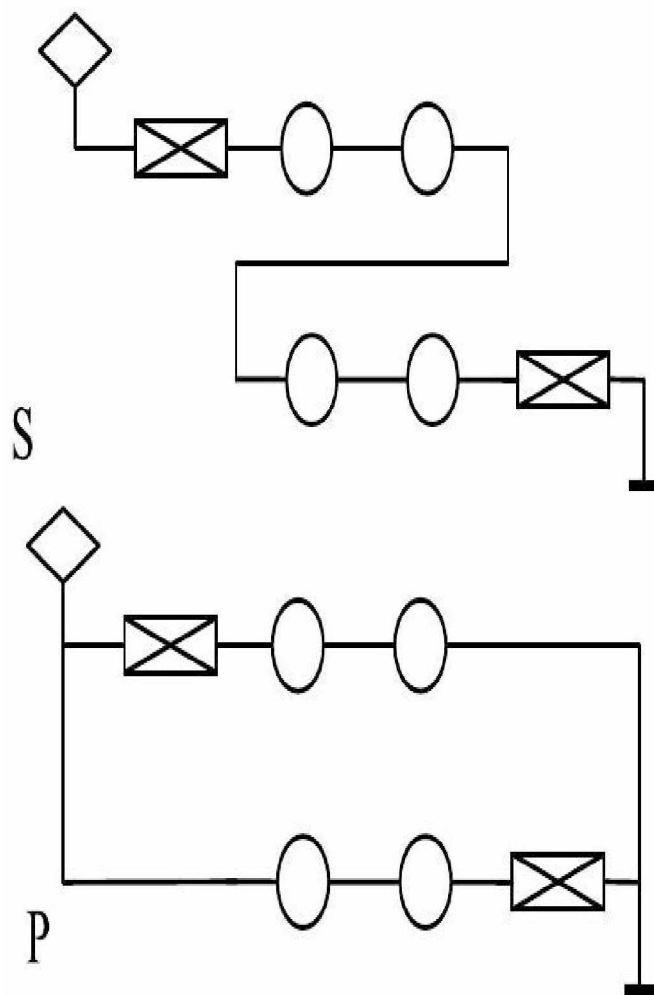
Двигун постійного струму із незалежним збудженням: принцип рекуперативного гальмування.



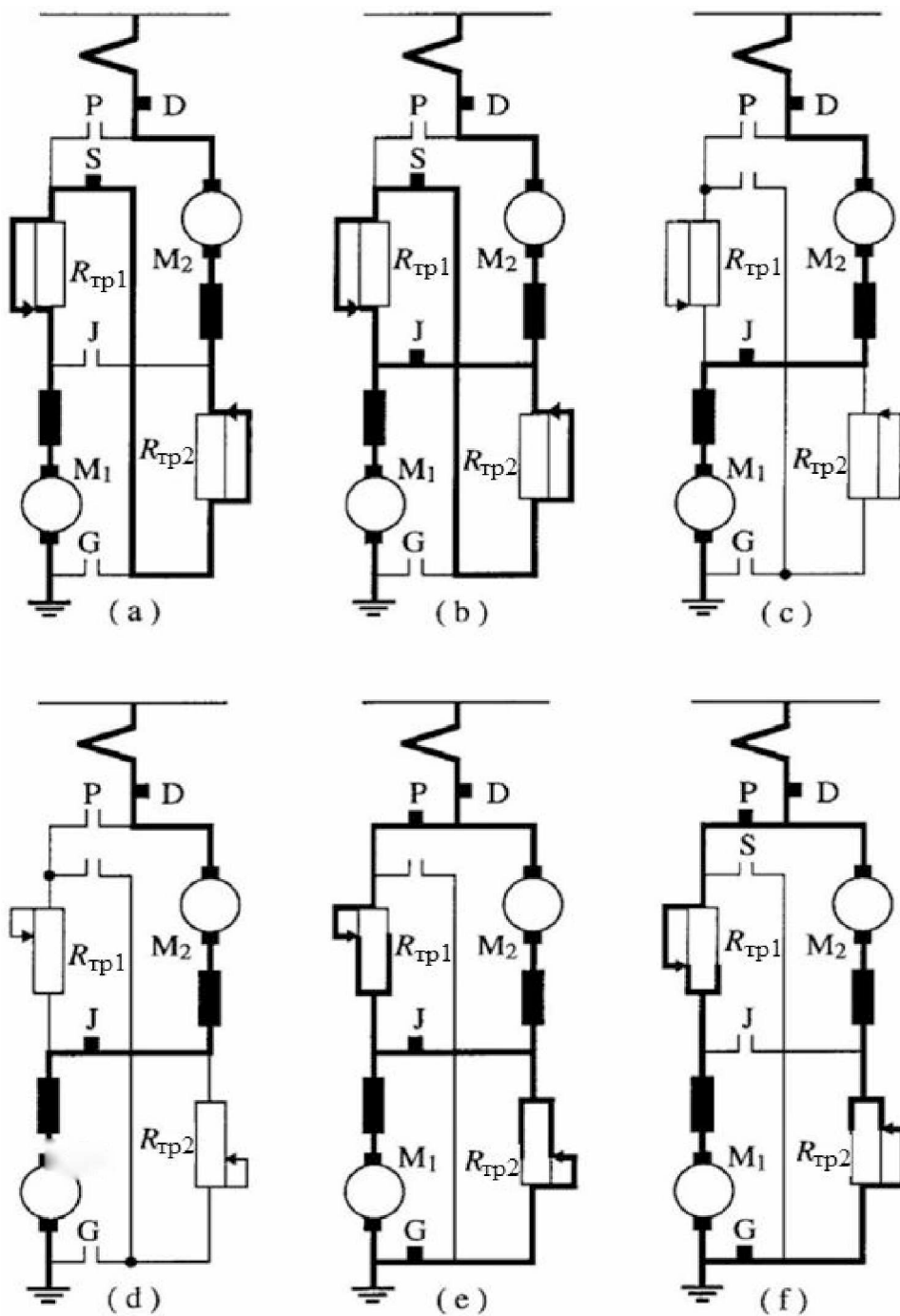
Двигун постійного струму: рекуперативне гальмування з незалежним збудженням: характеристики крутного моменту.



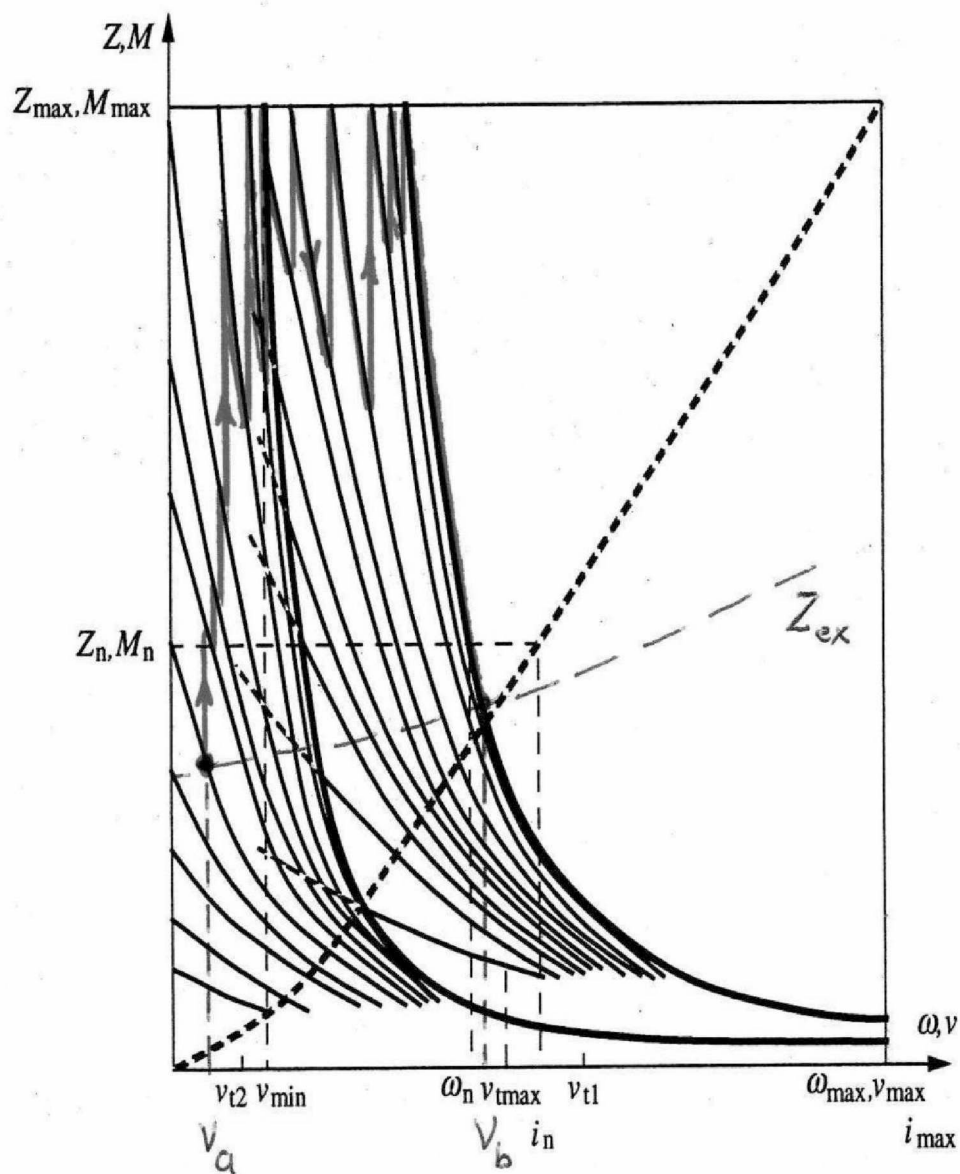
Двигуни, які розташовані послідовно (S) або паралельно (P).



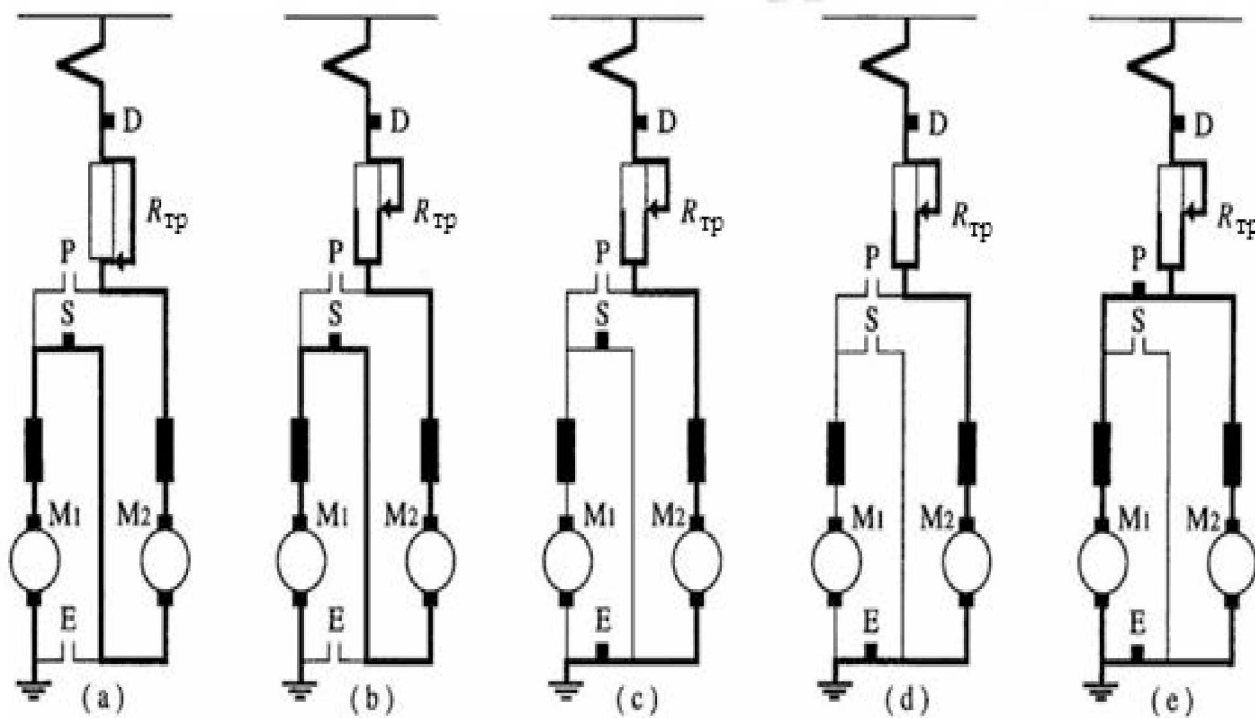
Послідовність кроків послідовно-паралельного переходу з мостовим методом (BOB: ABeh 4/4 II).



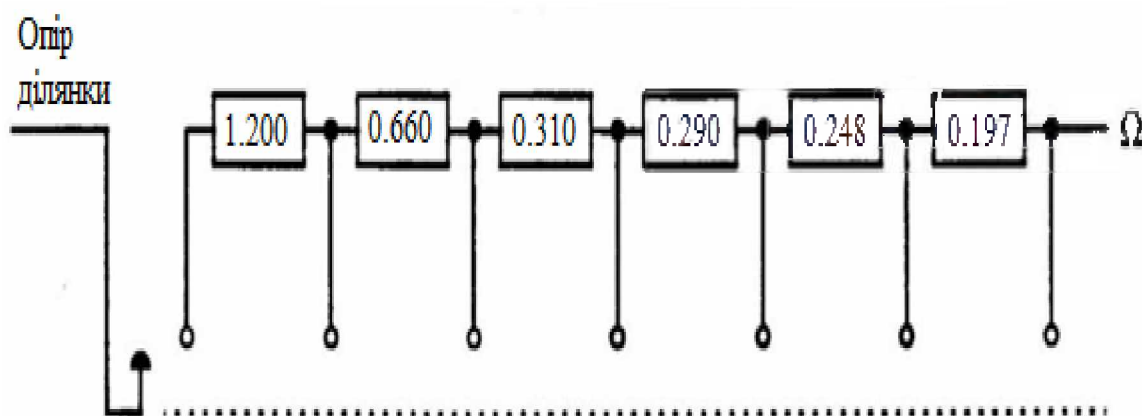
Розгін від V_a до V_b при максимальному тяговому зусиллі: траєкторія робочих точок.



Послідовність кроків під час переходу методом короткого замикання
(RhB : ABe4/4).

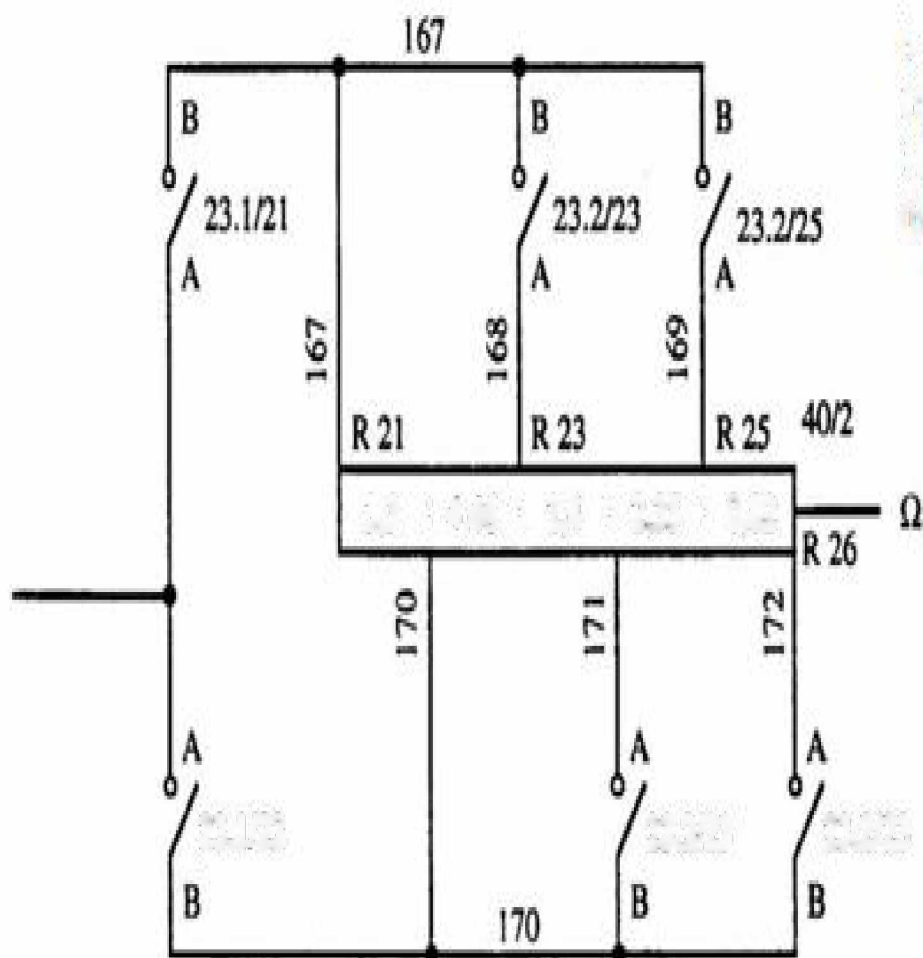


Приклад градуатора постійного струму. (SNCF: Z2, реостат № 1).



Додаток Н

Приклад реостату з контакторами. (ВОВ: АВен 4/4 ІІ, реостат №2).



Пуск поїзда: втрати у пусковому реостаті: одинарне сполучення (вгорі)
та послідовно-паралельне (внизу)

