

## ВПЛИВ РЕКУПЕРАЦІЇ ТА ВИБІГУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ

### Вступ

Як відомо, процес рекуперації на електрорухомому складі (ЕРС) застосовують з двома цілями: по-перше, для пригальмування (десь до 10 км/год) поїзда і, по-друге, з метою повернення електроенергії заради зменшення її об'єму споживання на електротягу при розв'язанні проблеми енергозбереження. При цьому тяговий струм, змінюючи свій напрямок протікання і стаючи генераторним, збільшує свої технологічні коливання у порівнянні з коливаннями у «чисто» тяговому режимі. І тоді, якщо навіть зазначені зміни струму у тяговому режимі обумовлюють зниження енергетичних показників ЕРС і збільшення в ньому додаткових втрат електроенергії [1], певно підсилена рекуперацією (та й вибігом) динаміка зміни струму обумовить ще більше зниження енергетичних характеристик і не лише ЕРС, але й елементів тягового електропостачання.

Тому метою цієї роботи і є оцінити, хоча б в першому наближенні, зазначений вплив рекуперації та вибігів на ділянках системи електротяги постійного струму; подібні опубліковані роботи авторам не відомі.

### Методи експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків

Експериментальні дослідження необхідних величин і розрахунки енергетичних показників виконували для електровозів і трамваїв.

Напруга  $U(t)$  на струмоприймачі і тяговий струм  $I(t)$  ЕРС в режимі рекуперації являються випадковими функціями часу – випадковими процесами (рис. 1). Для отримання їх імовірно-статистичних характеристик на діючих ділянках Придніпровської залізниці в процесі реальної експлуатації ЕРС було знято 40 реалі-

зацій  $U(t)$  та  $I(t)$  для електровозу ДЕ1 і 15 реалізацій – для ВЛ8. Крім того, було отримано також 15 реалізацій для трамваю типу ТЗД, що експлуатується на міських маршрутах електротранспорту. Тривалість реалізацій ЕРС складала ~70 хв., для трамваїв ~30 хв. Реалізації на ДЕ1 фіксували з бортового комп'ютера електровозу, на ВЛ8 – за допомогою розробленої мікропроцесорної системи. Вимірювання напруги на струмоприймачі  $U(t)$  та тягового струму  $I(t)$  трамваю виконувалось шляхом підключення персонального комп'ютера (ПК) до його контрольно-вимірювальної бортової системи, що містить датчики струму та напруги силового кола трамваю та аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Принципова схема контрольно-вимірювальної бортової системи приведена на рис. 2, де силове коло трамваю умовно позначено змінним резистором  $R$  (для трамваю з реостатним регулюванням) або силовим ( $IGBT$ ) транзистором  $VT$  (для тиристорного трамваю з імпульсним регулюванням). В якості датчиків використано індукційні датчики фірми LEM, робота яких базується на ефекті Холла. На рис. 2: LEM( $I$ ) та LEM( $U$ ) це датчики струму та напруги, які увімкнені в силове коло трамваю, відповідно, послідовно та паралельно. Їх встановлюють в безпосередній близькості від силового кабелю. По величині індукції навколо нього в датчиках створюється сигнал, пропорційний вимірюваній електричній величині. Даний сигнал є аналоговим і тому для запису далі він поступає на плату АЦП, де дискретизується з заданою тактовою частотою і зберігається в деякій базі даних. При експлуатації трамваю на ділянках дана інформація накопичується і потім переноситься на ПК для аналізу та розрахунків.

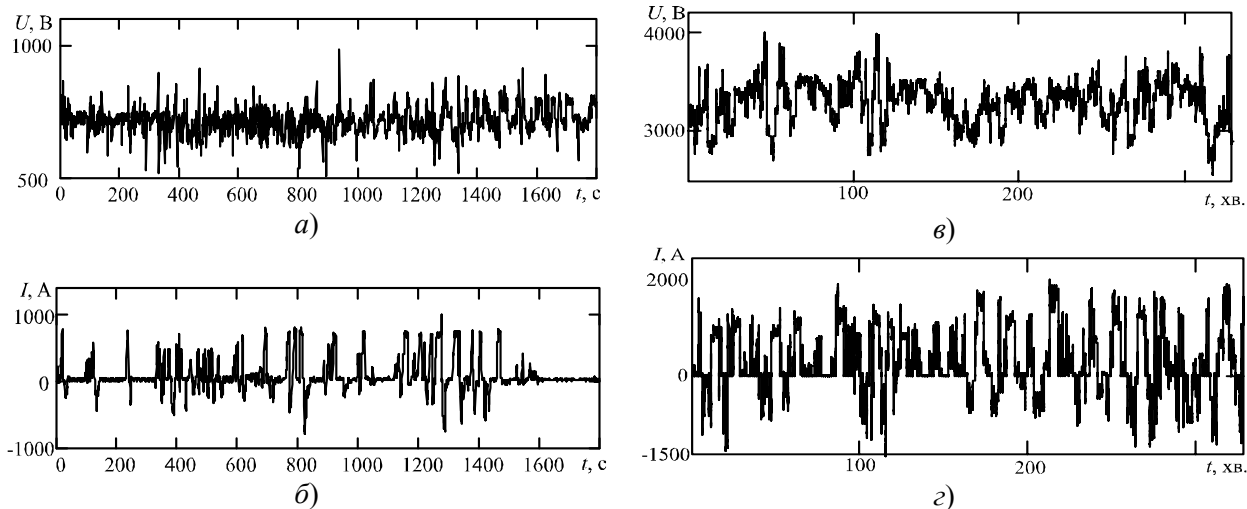


Рис. 1 – Графіки зміни в часі напруги (а) та струму (б) трамваю ТЗД, а також напруги (в) та струму (г) електровозу ВЛ8 в режимах тяги та рекуперації

Реалізації  $U(t)$  та  $I(t)$  реєструвались системою через інтервал часу дискретизації  $\Delta t$ , обраний згідно з теоремою Котельникова [1], як

$$\Delta t = \frac{0,5}{f_B},$$

де  $f_B$  – максимальна (верхня) частота спектру досліджуємих функцій  $U(t)$  та  $I(t)$ , що дорівнює  $(1/2 \dots 1/3) \text{ c}^{-1}$ . Згідно розрахункам частота вибірки склала  $1 \text{ c}^{-1}$ .

Підведено до ЕРС (або рекуперуєму) повну потужність  $S$ , а також її складові, активну  $P$  і реактивну по Фризе  $Q_\Phi$  визначали згідно [2], а енергетичні показники, коефіцієнт потужності  $\lambda$  та коефіцієнт реактивної потужності  $\text{tg } \varphi$ , – за виразами, приведеними в роботі [1].

### Результати розрахунків та їх аналіз

В табл. 1 наведено потужності та енергетичні коефіцієнти ЕРС у режимі рекуперації електровозів ВЛ8. Як бачимо, електроенергія, яка генерується рекуперацією такої якості, що коефіцієнт потужності  $\lambda$  електровозів помітно менше нормованого значення  $0,92 \dots 0,95$ , а коефіцієнт реактивної потужності  $\text{tg } \varphi$  значно перевищує допустиму величину  $0,25$ . Зрозуміло, що така неякісна рекуперуєма енергія буде

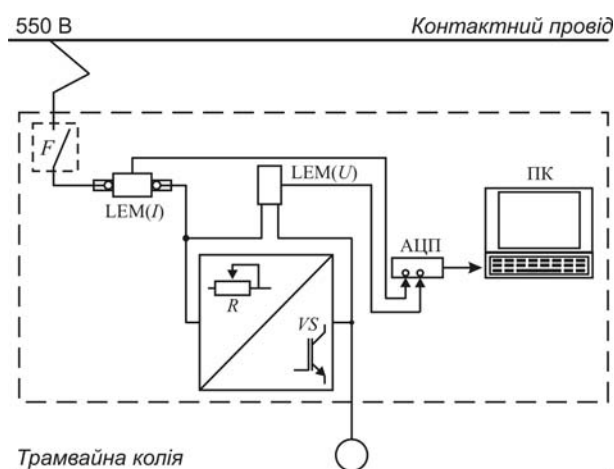


Рис. 2 – Принципова схема підключення ПК до контрольно-вимірювальної бортової системи трамваю для запису реалізацій  $U(t)$  та  $I(t)$

Таблиця 1

№ поїздки	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$Q_\Phi$ , квар	$\lambda$ , в. о.	$\text{tg } \varphi$ , в. о.
1	2	3	4	5	6
1.	714,32	564,153	53,248	0,790	0,777
2.	2222,9	1926,83	123,26	0,867	0,576
3.	1673,18	1562,27	95,344	0,934	0,384
4.	2569,86	2231,86	170,972	0,868	0,571
5.	2276,09	1972,43	211,091	0,866	0,576

			$U$ , В	$I$ , А	$S$ , кВА	$P$ , кВт	$Q_{\phi}$ , квар	$\lambda$ , в. о.
Тип трамваю	З реостатним регулюванням	З вибігом	714	312	116,1	223,1	0,52	190,5
		Без вибігу	699	512	281,7	358,2	0,786	221,3
	З імпульсним регулюванням	З рекуперацією і вибігами	711	254	55,7	180,8	0,308	172,0
		Без рекуперації і з вибігами	706	269	106,7	190,5	0,56	157,8
		Без рекуперації і вибігів	697	345	174,3	241,0	0,723	166,4
		Без рекуперації	705	251	106,8	177,3	0,602	141,5
	З рекуперацією	710	226	58,9	161,0	0,336	126,2	

обумовлювати некорисні додаткові втрати електроенергії не лише в силових тягових колах ЕРС, але і в проводах тягової мережі.

Аналогічний, дещо навіть різкіший, характер впливу рекуперації на коефіцієнт  $\lambda$  спостерігається у трамваїв (табл. 2): без рекуперації  $\lambda=0,602$ , а з рекуперацією  $\lambda$  зменшується у 1,65 рази. Вибіги ЕРС (перериви тягового струму) теж негативно впливають на якість електроенергії: без вибігів  $\lambda=0,786$ , а з ними –  $\lambda=0,52$ .

В якості прикладу впливу вибігів в табл. 3 наведено додаткові втрати потужності  $\Delta P$  в активних опорах тягових двигунів електровоза ВЛ8 за реалізаціями шести поїздок.

Таблиця 3

№ поїздки	$\frac{\Delta P}{P} \cdot 100$ , %	З вибігами		Без врахування часу вибігів	
		$\frac{\Delta P_p}{P} \cdot 100$ , %	$\frac{\Delta P_{\sim}}{P} \cdot 100$ , %	$\frac{\Delta P_p}{P} \cdot 100$ , %	$\frac{\Delta P_{\sim}}{P} \cdot 100$ , %
1	2	3	4	5	6
1	6,25	12,32	21,61	12,32	12,45
2	5,76	12,21	19,10	12,21	10,21
3	5,92	13,47	24,14	13,47	13,62
4	6,51	12,24	22,60	12,24	11,32
5	5,85	13,80	23,51	13,80	12,74
6	6,17	14,03	20,25	14,03	12,83

Із порівняння даних стовпців 4 і 6 табл. 3 впливає, що вибіги, збільшуючи реактивну складову тягового струму, обумовлюють відповідно втрати електроенергії на 12...14% більше, ніж без врахування часу вибігів.

Відомо, що робота електровозів без вибігів неможлива, тому паузи в тяговому струмі, а відповідно, нестабільне споживання ЕРС енергії з тягової мережі – це специфічний технологічний характер тягового навантаження. Тому заслуговує уваги питання установки на рухо-

мому складі накопичувача електроенергії великої енергоємності, який при неробочому ході ЕРС буде працювати в режимі підзарядки, споживаючи енергію з мережі певної величини тягового струму. При переході електровоза в тягу накопичувач повинен розряджатися, підживлюючи його силові кола. В такому випадку в тяговому режимі з мережі електровозом будуть споживатися вже менші тягові струми, оскільки частина енергії, споживаної накопичувачем на вибігах, буде повністю повертатися в силове коло ЕРС, а отже, в тяговому режимі на ЕРС будуть діяти два потоки енергії – з тягової мережі і накопичувача електроенергії.

## Висновки

1. Під час рекуперативного гальмування ЕРС генерується електроенергія низької якості, що спричинює додаткові втрати енергії в елементах системи електричної тяги.
2. Вибіги ЕРС те ж помітно зменшують його коефіцієнт потужності.
3. У зв'язку з зазначеним, потрібні докладні теоретичні та експериментальні дослідження процесів рекуперації та вибігів ЕРС, виходячи із умов необхідності розв'язання проблеми енергозбереження на електричному транспорті.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Саблін О. І. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу постійного струму: автореф. дис. ... на здобуття вчен. ступеня канд. техн. наук / Саблін Олег Ігорович. – Дніпропетровськ, 2009. – 21 с.
2. Костін М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними електроенергетичними процесами // Технічна електродинаміка. Тем. вип. ПСЕ – 2006. Частина 6, 2006. – С. 3-8.