

Сиченко В.Г., канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ АВТОБЛОКУВАННЯ ТА ПОВЗДОВЖНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНКАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Безперебійне і якісне електропостачання пристроїв залізничної автоматики від джерел електричної енергії є основою для надійного і безпечного функціонування транспортної системи. Пристрої залізничної автоматики, що входять до системи "сигналізація централізація блокіровка" (далі СЦБ), як споживачі першої категорії повинні одержувати живлення від двох взаємно резервованих джерел через дві взаємно резервовані лінії. Живлення пристроїв СЦБ здійснюють, як правило, по трифазним трипровідним лініям напругою 10 кВ від трифазних джерел живлення частотою 50 Гц з ізольованою нейтраллю. Основне живлення пристрої СЦБ одержують від спеціальних ліній автоблокування (ВЛ СЦБ), резервне живлення - на ділянках, електрифікованих по системі постійного струму, як правило, від трифазних ліній поздовжнього електропостачання (ПЕ) 10 кВ. В окремих випадках резервне живлення пристроїв СЦБ здійснюють від прилягаючих ліній напругою до 1000 В [1].

Відхилення напруги від номінального значення істотно впливає на роботу окремих елементів схем СЦБ. При значних відхиленнях напруги порушується регулювання рейкових ланцюгів, знижується надійність роботи пристроїв. Наприклад, при збільшенні напруги в порівнянні з номінальною усього на 10% термін служби світлофорних ламп скорочується з 1000 до 250 годин, тобто в 4 рази. Зниження напруги в порівнянні з номінальною на 20% зменшує видимість сигналу світлофора на 30%, що істотно відбивається на безпеці руху поїздів. Вимоги ПТЕ: "Номінальна напруга змінного струму на пристроях СЦБ повинна бути 110, 220 або 380 В. Відхилення від зазначених величин номінальної напруги допускаються убік зменшення не більше 10 %, а убік збільшення - не більше 5 %" не суперечать ГОСТу 13109-97, але в реальних умовах експлуатації можливі експлуатаційні зміни напруги перебувають у межах від 160 до 260 В. Причому це відноситься до статичних, тобто "повільних" змін напруги. Імпульсні відхилення напруги можуть бути значно більшими. Наприклад, при експлуатації можливе зниження напруги до нуля тривалістю в частки, одиниці секунд, а в аварійних випадках - набагато більше. Існують короткочасні імпульсні і високочастотні перешкоди значної амплітуди, діапазон яких нормується низкою вітчизняних і міжнародних стандартів. Цей вид перешкод є типовим і найбільш значимим для забезпечення усталеної роботи апаратури СЦБ і зв'язку. У першу чергу, це обумовлено тим, що канали передачі інформації на залізничному тра-

нспорті надзвичайно рознесені в просторі, довжини ліній зв'язку лежать у межах від десятків метрів до десятків кілометрів і більше. Це визначає їхню сприйнятливість до заважаючих сигналів, виникаючим від таких потужних генераторів перешкод, як грозові розряди, комутації струмів рухомого складу, випрямлячі тягових підстанцій і т.д.

Саме тому жорсткі вимоги до пристроїв зовнішнього електропостачання пред'являються не тільки за кількістю незалежних джерел живлення і часу переходу на резерв, але і по якості електроенергії безпосередньо на вводах релейних шаф перегінних пристроїв автоблокування і шинах ввідних панелей постів ЕЦ. Для забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання і гальванічної розв'язки з іншими електричними лініями на електрифікованих залізницях лінія ВЛ СЦБ отримує живлення від шин власних потреб тягової підстанції через підвищуючий трансформатор ТСЦБ. Таким чином обмежуються струми однофазного замикання на землю, впливаючі на лінії зв'язку і рейкові кола СЦБ. Крім того, обмеження довжини розгалужень гальванічно зв'язаних електричних систем полегшує умови захисту від подвійних коротких замикань у найбільш віддалених точках цих систем. Зазначимо, що пристрої СЦБ мають два шляхи можливого електромагнітного впливу: проникнення кондуктивних завад через кола живлення та сигнальні кола та через наведення польових завад.

Мета роботи

Дослідження рівнів кондуктивних завад у високовольтних живильних лініях залізничної автоматики на електрифікованих ділянках постійного струму.

Викладення основного матеріалу

Як відомо, спотворення форми синусоїдального струму і напруги виникають, головним чином, при перетворенні змінного струму в постійний і навпаки. Перетворювальний агрегат генерує в живлячу мережу вищі гармонійні складові з номерами $6k \pm 1$ при 6-пульсовій схемі випрямлення та з номерами $12k \pm 1$ при 12-пульсовій схемі випрямлення. Окрім цих "канонічних" гармонік, в результаті дії різних факторів (несиметричні режими, комутаційні процеси та ін.) в живильній мережі можливе виникнення і "неканонічних" гармонік. Вищі гармонійні складові (ВГ) на частоті, близькій до частоти роботи рейкових кіл, накладаючись на корисний сигнал можуть приводити до порушення роботи пристроїв залізничної автоматики, викликаючи при цьому аварійні ситуації. Для вивчення рівнів ВГ у високовольтних живлячих лініях залізничної автоматики дослідження проводились на тягових підстанціях Придніпровської залізниці: з 6-пульсовою схемою випрямлення та 12-пульсовою схемою випрямлення.

Вибіркові результати вимірювань наведені на рисунках 1-20, а узагальнені статистичні дані в таблиці 1.

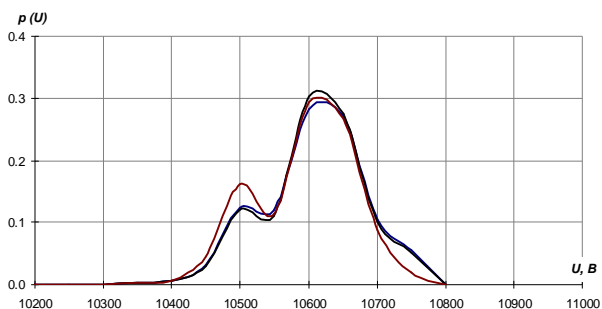


Рис. 1. Емпіричні розподіли напруги в лінії ПЕ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

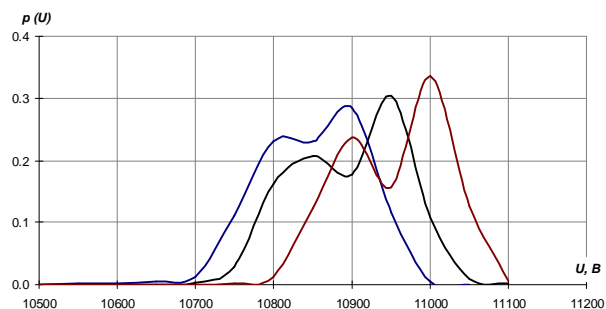


Рис. 2. Емпіричні розподіли напруги в лінії СЦБ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

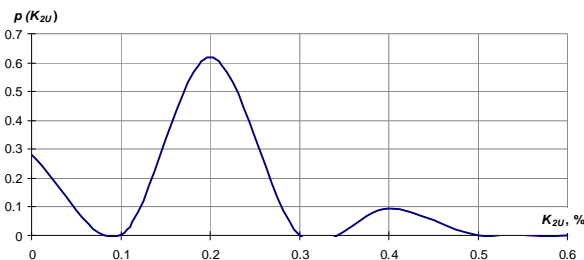


Рис. 3. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в лінії ПЕ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

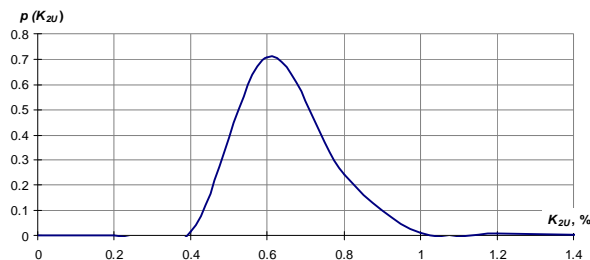


Рис. 4. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в лінії СЦБ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

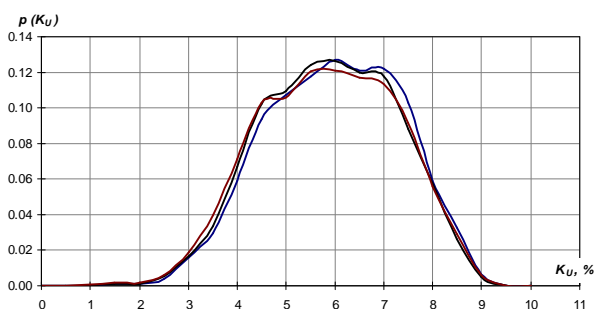


Рис. 5. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в лінії ПЕ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

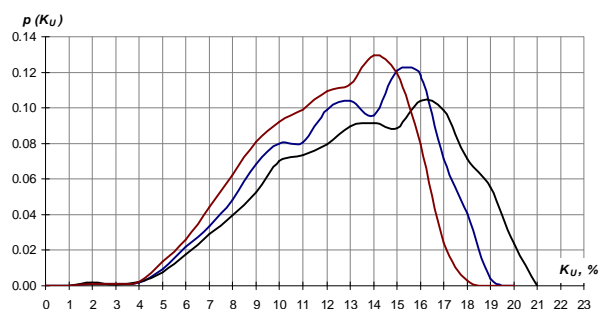


Рис. 6. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в лінії СЦБ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

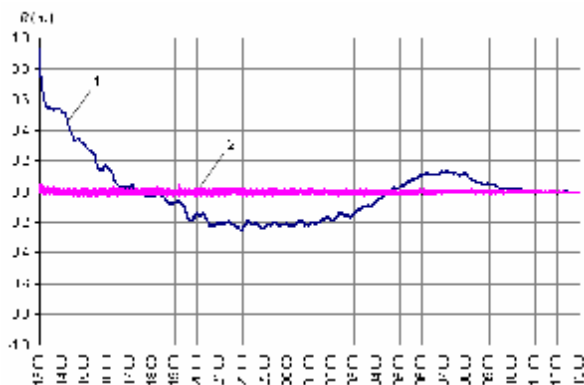


Рис. 7. Корелограма напруги прямої (1) та зворотної (2) послідовності в лінії ПЕ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

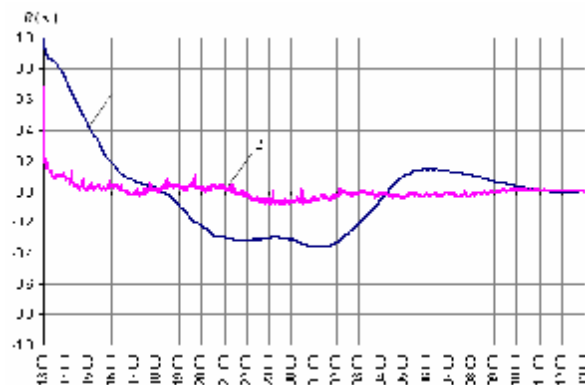


Рис. 8. Корелограма напруги прямої (1) та зворотної (2) послідовності в лінії СЦБ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

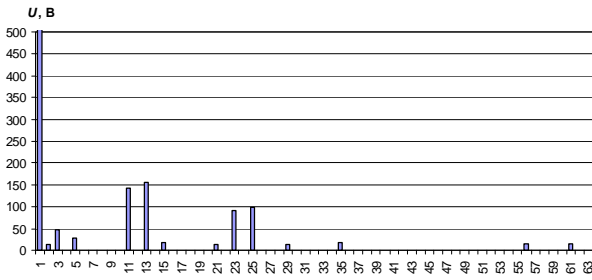


Рис. 9. Спектр напруги ПЕ 10 кВ 28.10.2009 13:00 в лінії ПЕ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

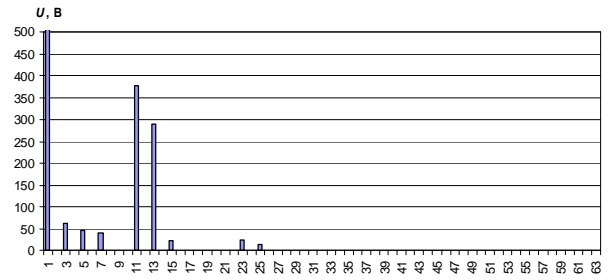


Рис. 10. Спектр напруги СЦБ 10 кВ 28.10.2009 13:00 в лінії СЦБ при 12-ти пульсовій схемі випрямлення

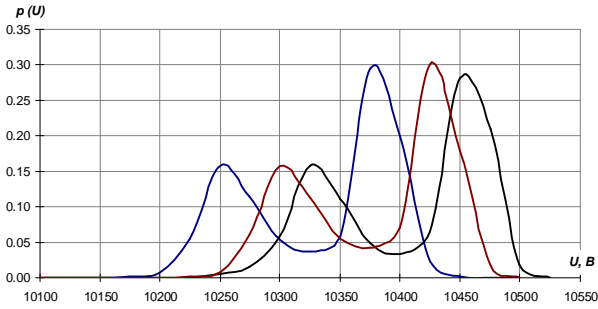


Рис. 11. Емпіричні розподіли напруги в лінії ПЕ в лінії ПЕ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

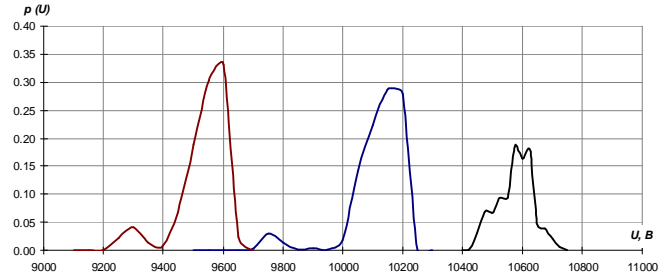


Рис. 12. Емпіричні розподіли напруги в лінії СЦБ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

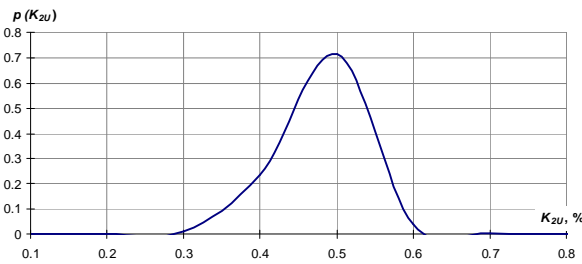


Рис. 13. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в лінії ПЕ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

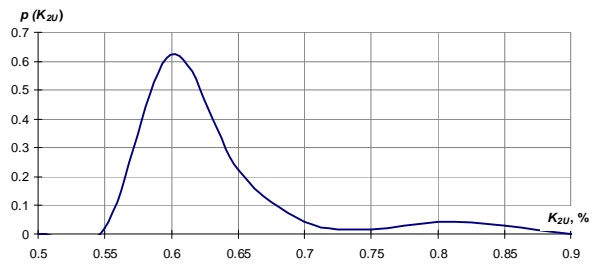


Рис. 14. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в лінії СЦБ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

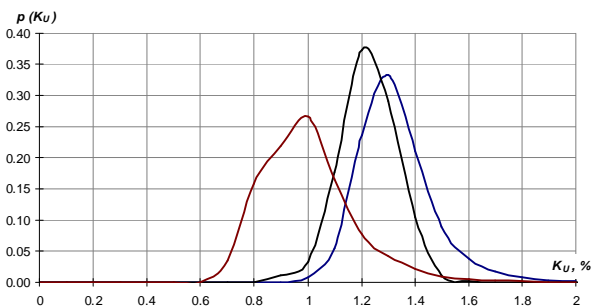


Рис. 15. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в лінії ПЕ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

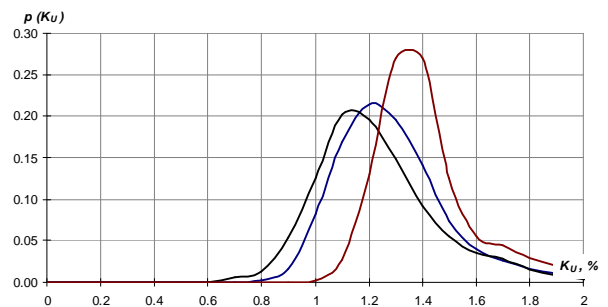


Рис. 16. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в лінії СЦБ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

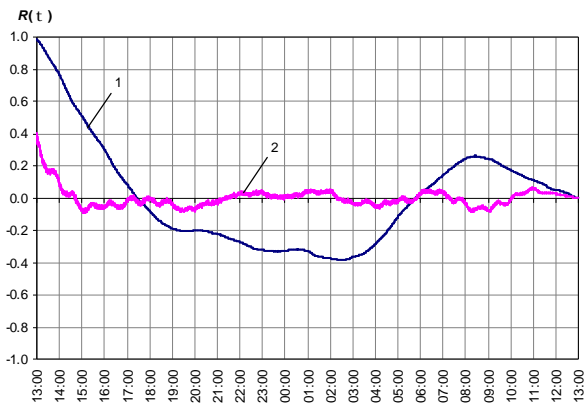


Рис. 17. Корелограма напруги прямої (1) та зворотної (2) послідовності в лінії ПЕ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

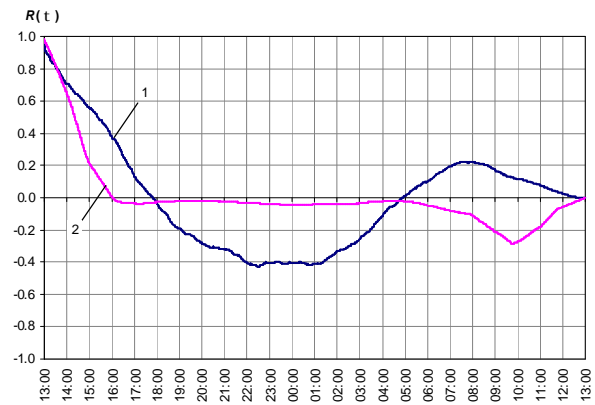


Рис. 18. Корелограма напруги прямої (1) та зворотної (2) послідовності в лінії СЦБ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

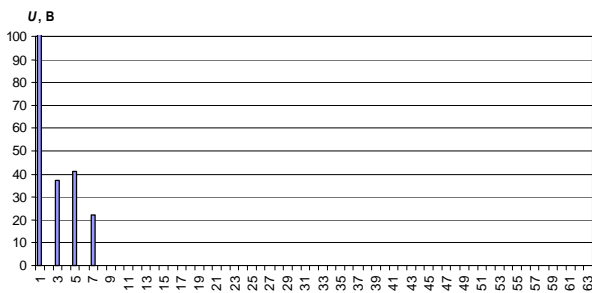


Рис. 19. Спектр напруги 09.11.2009 13:00 лінії ПЕ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

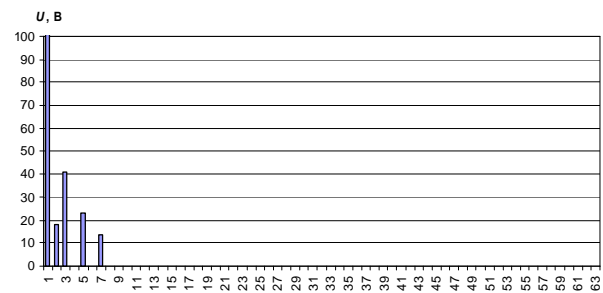


Рис. 20. Спектр напруги 09.11.2009 13:00 лінії СЦБ при 6-ти пульсовій схемі випрямлення

В процесі дослідження, окрім іншого, проводився аналіз діаграм розкиду K_U та K_{2U} в залежності від зміни тягового навантаження та напруги на шинах 3,3 кВ. Було встановлено, що коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на шинах 10 кВ (ПЕ і СЦБ) фактично не залежить від зміни напруги та струму сторони постійного струму, як на підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення, так і на підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги для підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення має близьку до одиниці від'ємну нелінійну кореляцію зі зміною напруги (рис. 21) та позитивну нелінійну кореляцію зі зміною струму тягового навантаження (рис. 22). В той же час для підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення залежність досить низька: від зміни напруги – для ПЕ $R_{x,y}=0,109$, для СЦБ $R_{x,y}=0,176$; від зміни струму – для ПЕ $R_{x,y}=-0,071$, для СЦБ $R_{x,y}=-0,04$.

Описані вище результати досліджень відносяться до нормальних умов експлуатації тягової мережі. При комутаційних процесах в тяговій мережі на шинах 10 кВ виникають короточасні перехідні процеси, які викликають появу широкого спектру ВГ. В якості прикладу на рис. 23-26 наведені порівняльні діаграми спектрів ВГ в нормальному режимі та при короткому замиканні.

Зведена таблиця показників якості електроенергії в лініях ПЕ та СЦБ тягових підстанцій

Таблиця 1

Показник	Числові характеристики	Підстанція "С"						Підстанція "Н"					
		ПЕ 10 кВ			СЦБ 10 кВ			ПЕ 10 кВ			СЦБ 10 кВ		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Рівень напруги НДЗ = 10 000 ± 500 В ГДЗ = 10 000 ± 1000 В	$M(U)$, кВ	10,59	10,59	10,57	10,82	10,87	10,93	10,32	10,39	10,37	10,09	10,65	9,51
	max, кВ	10,77	10,77	10,77	10,98	11,09	11,08	10,43	10,50	10,47	10,22	16,54	9,79
	min, кВ	10,26	10,26	10,26	10,52	10,66	10,72	10,15	10,23	10,20	9,65	10,39	9,19
Відхилення напруги δU НДЗ = 5 % ГДЗ = 10 %	$M(\delta U)$, %	5,86	5,86	5,86	8,25	8,71	9,29	3,21	3,93	3,68	1,20	6,52	4,93
	max, %	7,69	7,69	7,69	9,85	10,91	10,80	4,35	4,97	4,74	3,51	65,39	8,15
	min, %	2,56	2,56	2,57	5,25	6,61	7,20	1,52	2,26	2,02	0	3,94	2,05
Частота напруги f НДЗ = 50 ± 0,2 Гц ГДЗ = 50 ± 0,4 Гц	$T1$, %	83,5	83,9	78,1	100	100	100	0	0	0	0	3,94	2,05
	$T2$, %	0	0	0	0	1,02	13,27	0	0	0	0	84,2	33,4
	$M(f)$, Гц	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої на- пруги k_U НДЗ = 5 % ГДЗ = 8 %	max, Гц	50,07	50,07	49,94	49,94	49,94	49,85	49,85	49,85	49,85	49,85	49,85	49,85
	min, Гц	49,94	49,94	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
	$T1$, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній по- слідності k_{2U} НДЗ = 2 % ГДЗ = 4 %	$M(k_U)$, %	5,79	5,68	5,66	12,27	13,17	11,44	1,33	1,23	1,00	1,68	1,25	1,42
	max, %	9,20	9,10	9,20	18,80	21,20	17,80	2,30	1,60	2,00	28,2	3,0	2,60
	min, %	0,90	1,00	0,80	1,50	1,50	1,50	0,90	0,80	0,70	0,80	0,60	1,00
Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній по- слідності k_{2U} НДЗ = 2 % ГДЗ = 4 %	$T1$, %	68,8	66,4	65,3	98,7	98,8	98,2	0	0	0	1,5	0	0
	$T2$, %	3,96	3,15	3,49	88,3	90,2	84,9	0	0	0	1,5	0	0
	$M(k_{2U})$, %	0,15	0,15	0,15	0,57	0,57	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній по- слідності k_{2U} НДЗ = 2 % ГДЗ = 4 %	max, %	0,51	0,51	0,51	2,62	2,62	2,62	0,72	0,72	0,72	1,86	1,86	1,86
	min, %	0	0	0	0,23	0,23	0,19	0,19	0,19	0,19	0,92	0,92	0,92
	$T1$, %	0	0	0	0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0

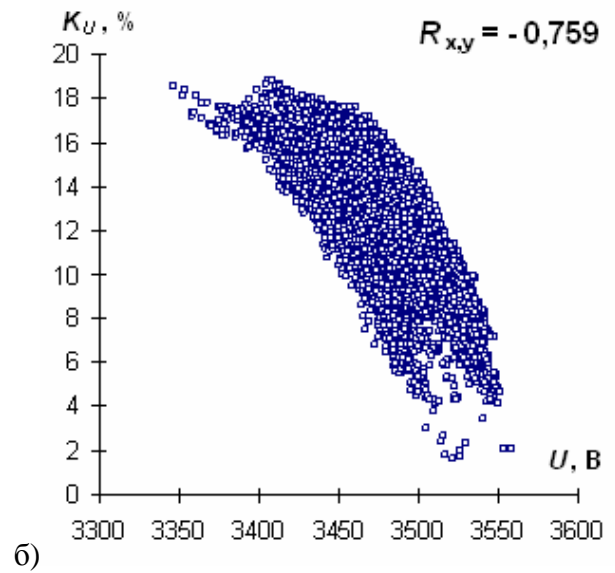
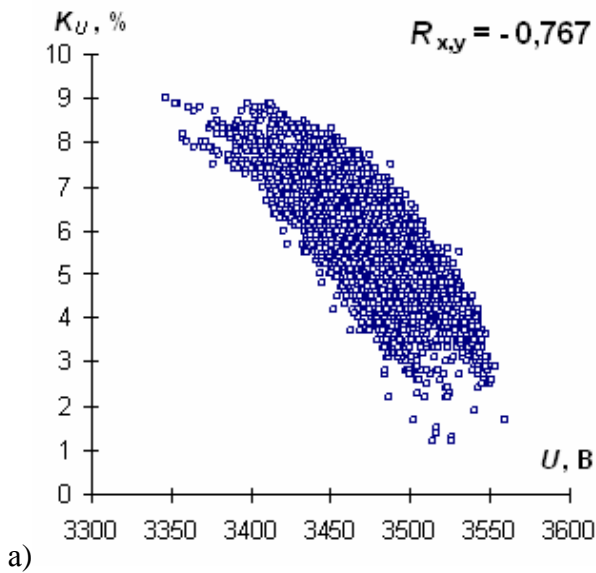


Рис. 21. Діаграми розкиду коефіцієнту спотворення синусоїдності напруги для підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення для лінії ПЕ (а) та лінії СЦБ (б)

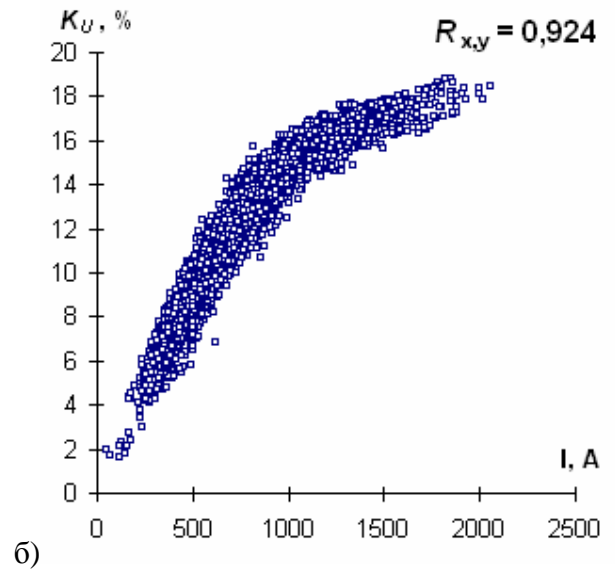
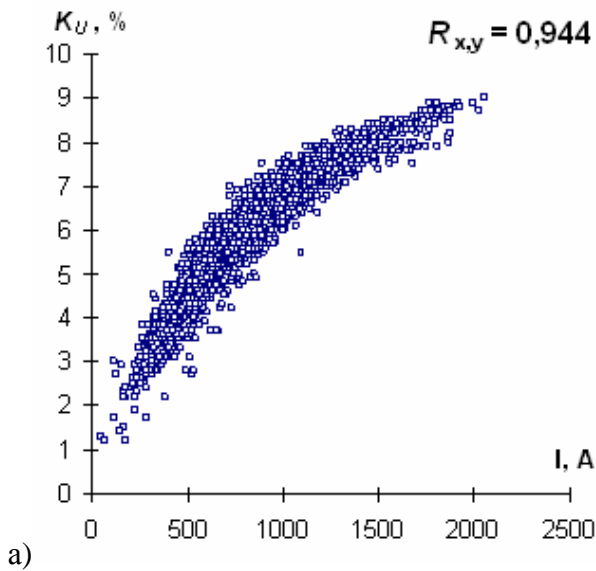


Рис. 22. Діаграми розкиду коефіцієнту спотворення синусоїдності напруги для підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення для лінії ПЕ (а) та лінії СЦБ (б)

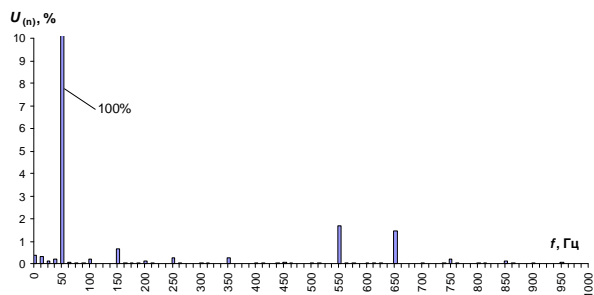


Рис. 23. Відносний спектр напруги в нормальному режимі для лінії ПЕ

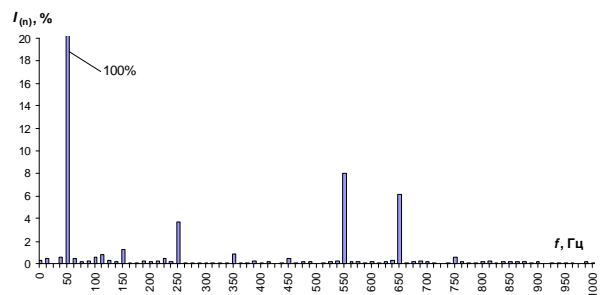


Рис. 24. Відносний спектр струму в нормальному режимі для лінії СЦБ

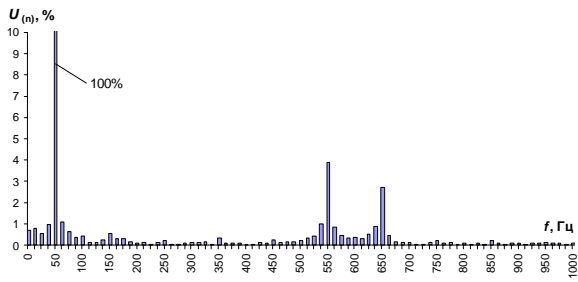


Рис. 25. Відносний спектр напруги при короткому замиканні для лінії ПЕ

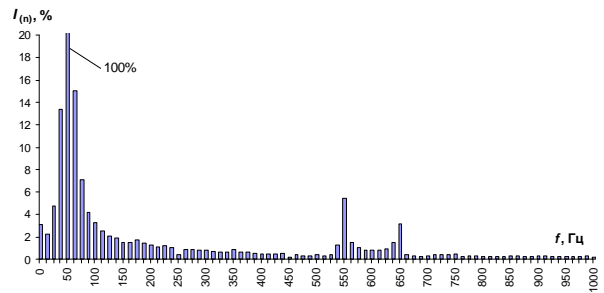


Рис. 26. Відносний спектр струму при короткому замиканні для лінії СЦБ

Висновки

В результаті проведених комплексних досліджень якості електричної енергії на шинах 10 кВ (приєднань ПЕ і СЦБ) тягових підстанцій постійного струму встановлено наступне:

1. Рівень напруги на шинах 10 кВ (ПЕ і СЦБ) знаходиться в припустимих межах згідно до вимог ГОСТ 13109-97, що відповідає даним, отриманим раніше на інших залізницях [2]. При цьому в лінії СЦБ зафіксовані значні короткочасні викиди напруги, тому необхідно розробляти заходи захисту від перенапруг. Розподіли напруг мають двомодальний характер, що можна пояснити зміною режимів роботи системи зовнішнього електропостачання (день – збільшення навантаження енергосистеми, ніч – його зниження).

2. Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності в лініях СЦБ значно вищий (більше ніж в 3 рази) у порівнянні з лініями ПЕ, що спонукає ставити питання необхідності симетрування напруг у лініях СЦБ.

3. Спектри ВГ на шинах 10 кВ в нормальному режимі роботи окрім “канонічних”, мають і “неканонічні” складові. При аварійних режимах ширина спектру ВГ значно збільшується, що необхідно враховувати при розгляді питань електромагнітної сумісності ліній ПЕ і СЦБ з пристроями залізничної автоматики.

4. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги в лінії СЦБ на тяговій підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення значно перевищує гранично допустиме значення та майже вдвічі більший за КУ в лінії ПЕ. При цьому КУ і на тяговій підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення більший в порівнянні з лінією ПЕ. Звідси, можна зробити висновок, що існуюча ідеологія живлення лінії СЦБ з застосуванням подвійної трансформації, виконуючи завдання обмеження струмів короткого замикання та гальванічної розв’язки, по суті різко погіршує якість електричної енергії, що формує умови погіршення електромагнітної сумісності.

5. Питання про поліпшення якості електричної енергії в лініях СЦБ встановленням високовольтних компенсаційних фільтрів [3] повинне вирішуватись з урахуванням конкретних умов з аналізом роботи системи зовнішнього електропостачання на основі техніко-економічних розрахунків. При цьому основним, на наш погляд, має бути варіант застосування силового активного фільтру на

стороні 0,38 кВ в місці споживання електроенергії, що унеможливить проникнення кондуктивних завад у рейкові кола через схеми живлення.

Список літератури

1. Сиченко, В. Г. Електроживлення пристроїв залізничної автоматики. [Текст]/ В. Г. Сиченко, В. І. Гаврилюк. Дн-вськ.: Вид-во ЧП "Маковецький", 2009. – 372 с.
2. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму електрифікованих залізниць. [Текст]/ В. Г. Сиченко та ін.// Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ, Вип. 81 – 2008, с. 53-60 .
3. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость. [Текст]: Учеб. для вузов ж.д.тр-а. / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.