

**В.Г. Сиченко, канд. техн наук, В.А. Зубенко, Д.О. Босий**

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

**М.О. Фесик**

(Україна, Львів, ДП Львівська залізниця),

**В.М. Козачок**

(Україна, Харків, ДП Південна залізниця),

**В.М. Коротун**

(Україна, Красноармійськ, ДП Донецька залізниця)

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

### **Вступ**

У реальних умовах виробництва, перетворення, розподілу і споживання електроенергії виникають спотворення форми синусоїдального струму і напруги. Ці спотворення виникають при генерації електроенергії, передачі електроенергії по мережах і, головним чином, при споживанні, зв'язаному в основному з перетворенням змінного струму в постійний і навпаки. Головною причиною виникнення спотворень є нелінійні елементи в системі електропередачі і споживання. Джерелами спотворення струмів і напруг у системі електропостачання залізниці постійного струму є перетворювальні агрегати тягових підстанцій, лінії зовнішнього електропостачання, елементи тягової мережі, розподільні лінії поздовжнього електропостачання і автоблокування, електрорухомий і рухомий склад з імпульсними перетворювачами.

Тягова мережа електрифікованих залізниць постійного струму одержує живлення від підстанцій, обладнаних напівпровідниковими перетворювачами. При цьому в тягову мережу разом з постійною складовою надходить змінна складова напруги, яка є наслідком пульсації випрямленої напруги. У випрямленій нарузі міститься певний спектр гармонік, який залежить від ряду факторів: схеми перетворювача, характеру навантаження, якості первинної напруги тягової підстанції, параметричної несиметрії елементів схеми перетворювачів, несиметрії кутів керування тиристорами інверторів та ін. [1].

Досвід експлуатації електрифікованих залізниць постійного струму, ряд теоретичних досліджень режимів роботи перетворювачів тягових підстанцій свідчать, що в кривій випрямленої напруги тягової підстанції, при несиметричній живлячій нарузі, присутні гармоніки, кратні 100 Гц. Результати експериментальних досліджень показують, що на ряді тягових підстанцій випрямлена напруга містить не тільки гармоніки, кратні 100 Гц, але й гармоніки непарного ряду 50 Гц, 150 Гц, 250 Гц значної величини. У цих умовах типові згладжуючі пристрої, установлені на тягових підстанціях, часто не можуть забезпечити необхідні норми рівня перешкод у суміжних пристроях: гармоніку ж 50 Гц усі резонансні фільтри підсилюють. У той же час, якщо гармоніки парного ряду,

кратні 100 Гц, викликають перешкоди, головним чином, у лініях зв'язку, то наявність гармоніки 50 Гц у рейкових колах сполучена зі збудженням перешкод у системі залізничної автоматики: СЦБ і АЛС.

Надійна робота, ефективне використання електроустаткування і електромагнітна сумісність системи електропостачання і суміжних пристроїв багато в чому визначається якістю електричної енергії як на вході тягової підстанції, так і на її виході. Показники якості електричної енергії в тягових мережах у загальному випадку регламентують рівні електромагнітної сумісності. Завдання електромагнітної сумісності електрифікованої залізниці постійного струму зі суміжними пристроями, у першу чергу, із системами зв'язку і залізничної автоматики, зводиться до забезпечення на шинах тягової підстанції постійного струму (ТП) прийнятних показників якості електричної енергії (ПЯЕ) на всіх рівнях перетворення електричної енергії.

### ***Мета роботи***

Проведення досліджень якості електричної енергії на тягових підстанціях для встановлення відповідності рівнів її електромагнітної сумісності з суміжними системами.

### ***Виклад основного матеріалу***

Дослідження ПЯЕ проводились на Донецькій (підстанція О), Львівській (підстанції Л та С) та Південній (підстанція З) залізницях. Типова схема проведення вимірювань наведена на рис.1. Прилади на кожній підстанції підключались до вторинних кіл трансформаторів первинної напруги та 10 кВ. За допомогою кіловольметра РД-140 (Львівська залізниця) зафіксовані значення напруги на шинах 3,3 кВ та її спектральний склад. Крім того, за допомогою гнучких кліщів Роговського фіксувалася змінна складова струму відсосу тягової підстанції.

Вибіркові результати вимірювань наведені на рисунках 2-14, а узагальнені статистичні дані в табл. 1, 2.

Рівень напруги на шинах 3,3 кВ (як приклад, підстанції “Л”), показано на рис. 6. Різкі зміни напруги на шинах відповідають моментам зміни режимів роботи підстанції: інверторний режим – стрибок угору, випрямний режим – стрибок униз.

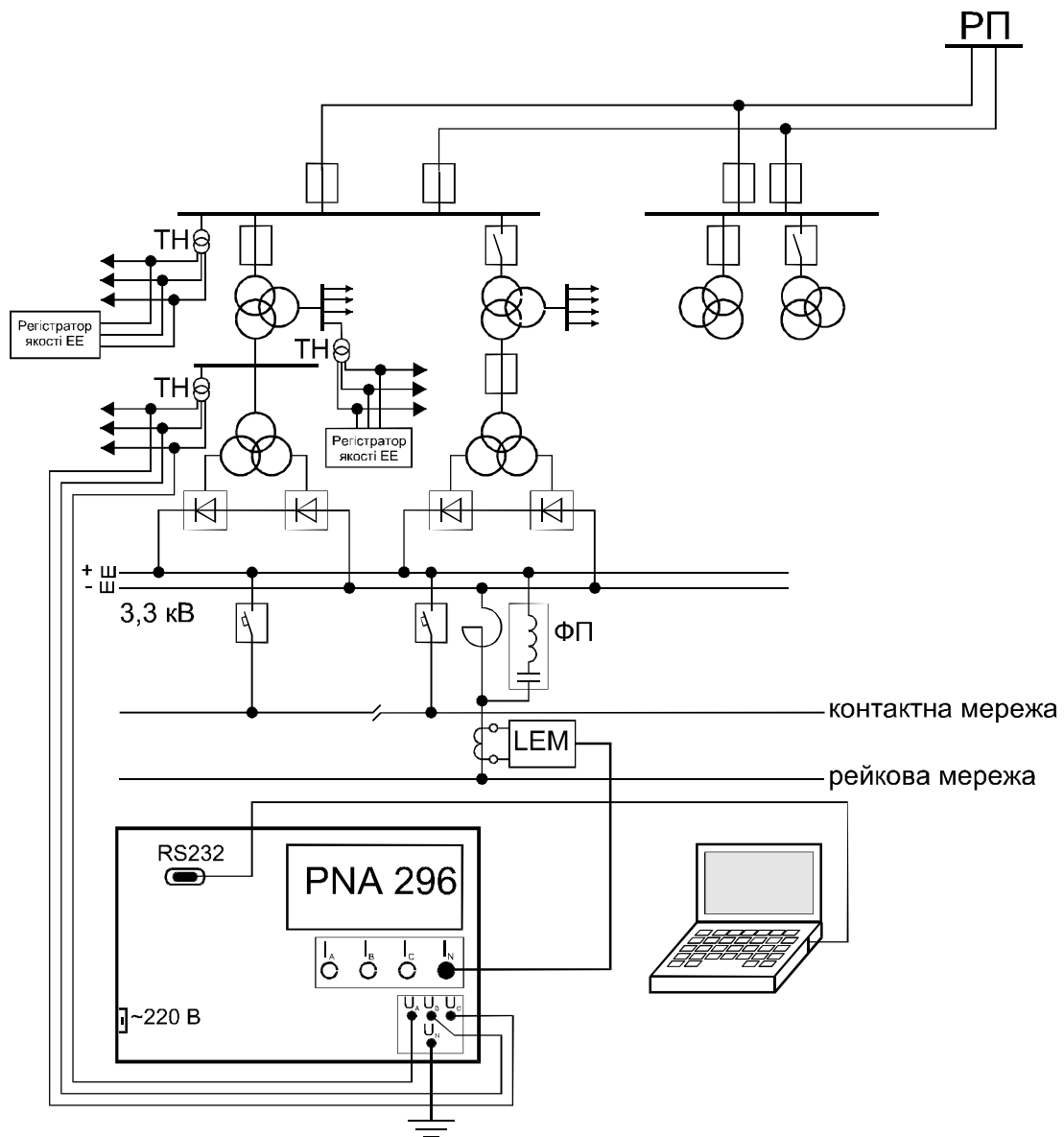


Рис. 1. Типова схема проведення вимірювань на тягових підстанціях

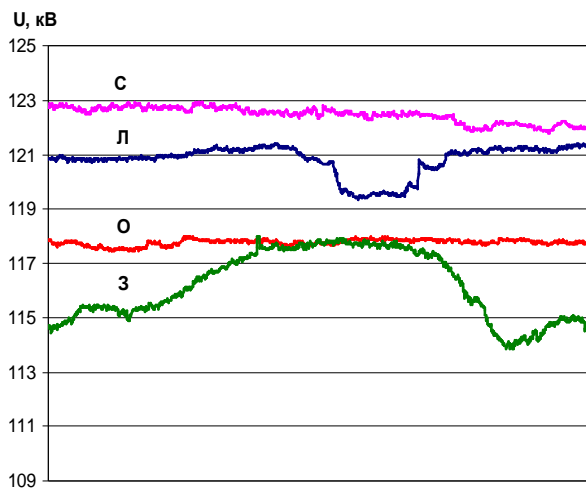


Рис. 2. Рівень вхідної напруги, фаза АВ на всіх підстанціях

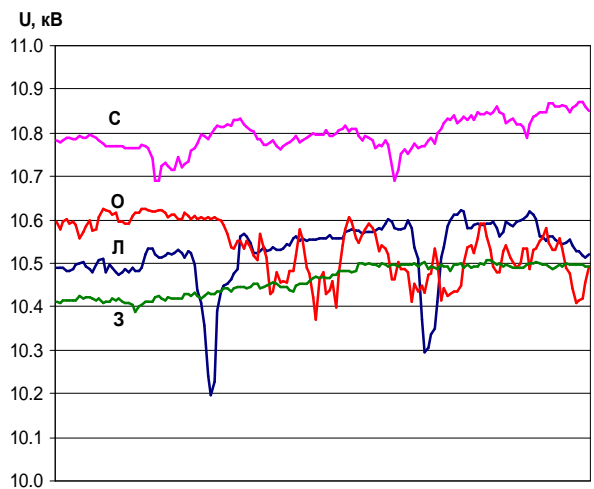


Рис. 3. Рівень напруги на шинах 10 кВ, фаза АВ на всіх підстанціях

Таблиця 1

Зведена таблиця показників якості електроенергії на вводах 110 кВ тягових підстанцій

Показник	Статистичні характеристики	Тягова підстанція											
		Л			С			О			З		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
Рівень напруги 110 кВ	$M(U)$ , кВ	121,4	121,9	121,1	122,6	123,0	121,9	117,9	118,1	117,7	116,2	116,4	115,6
	max, кВ	123,0	123,5	122,7	123,4	123,8	122,7	119,0	119,2	118,7	117,9	118,1	117,4
	min, кВ	118,4	119,0	118,1	120,5	121,4	120,9	116,5	116,7	116,2	113,8	114,1	113,3
Відхилення напруги $\delta U$	$M(\delta U)$ , %	10,36	10,82	10,08	11,44	11,83	10,85	7,21	7,38	6,96	5,64	5,77	5,11
	max, %	11,86	12,28	11,59	12,16	12,54	11,53	8,15	8,36	7,94	7,26	7,31	6,69
	min, %	7,65	8,17	7,40	9,54	10,34	9,87	5,94	6,12	5,67	3,48	3,71	3,02
	$T1$ , %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	59,3	69,1	50,1
	$T2$ , %	60,72	77,04	50,91	99,99	100	99,99	0	0	0	0	0	0
Частота напруги $f$	$M(f)$ , Гц	50			49,99			49,99			50		
	max, Гц	50,06			50,04			50,05			50,04		
	min, Гц	49,92			49,94			49,95			49,96		
	$T1$ , %	0			0			0			0		
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги $k_U$	$M(k_U)$ , %	1,72	1,81	1,78	1,60	1,72	1,55	1,12	1,35	1,10	1,47	1,44	1,04
	max, %	2,90	3,10	2,90	2,10	2,20	2,00	1,80	2,20	1,80	1,73	1,85	1,57
	min, %	1,10	1,00	1,20	1,20	1,40	1,30	0,80	0,80	0,70	1,22	1,08	0,78
	$T1$ , %	12,48	26,13	17,02	0,10	1,72	0	0	0,16	0	0	0	0
Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності $k_{2U}$	$M(k_{2U})$ , %	0,46			0,61			0,26			0,38		
	max, %	0,78			0,80			0,36			0,47		
	min, %	0,33			0,48			0,17			0,31		
	$T1$ , %	0			0			0			0		

Зведена таблиця показників якості електроенергії на шинах 10 кВ тягових підстанцій

Показник	Статистичні характеристики	Тягова підстанція											
		Л			С			О			З		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
Рівень напруги 10 кВ	$M(U)$ , кВ	10,57	10,55	10,54	10,80	10,80	10,75	10,59	10,63	10,58	10,791	10,754	10,773
	max, кВ	10,72	10,70	10,69	10,87	10,88	10,82	11,11	11,12	11,10	11,111	11,072	11,094
	min, кВ	10,20	10,18	10,17	10,69	10,70	10,65	10,30	10,34	10,29	10,387	10,361	10,378
Відхилення напруги $\delta U$	$M(\delta U)$ , %	5,67	5,54	5,38	7,95	8,02	7,51	5,91	6,26	5,84	7,91	7,54	7,73
	max, %	7,17	7,01	6,88	8,72	8,76	8,24	11,05	11,21	11,02	11,11	10,72	10,94
	min, %	1,96	1,84	1,70	6,90	7,01	6,49	3,05	3,36	2,93	3,87	3,61	3,78
	$T1$ , %	83,75	81,88	71,88	100	100	100	85,50	92,00	83,42	77,1	72,5	74,1
	$T2$ , %	0	0	0	0	0	0	1,50	1,50	1,50	36,4	32,5	35,7
Частота напруги $f$	$M(f)$ , Гц	50			49,99			49,99			50		
	max, Гц	50,05			50,03			50,03			50,03		
	min, Гц	49,92			49,95			49,96			49,95		
	$T1$ , %	0			0			0			0		
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги $k_U$	$M(k_U)$ , %	2,88	2,81	2,66	2,36	2,26	2,25	4,31	4,39	4,20	1,90	1,74	1,56
	max, %	5,99	5,91	5,81	5,04	5,58	4,79	7,34	7,51	7,34	4,95	4,99	4,80
	min, %	1,58	1,50	1,33	1,17	1,04	1,03	0,83	0,78	0,60	1,09	0,72	0,60
	$T1$ , %	8,44	8,44	7,50	0,61	0,61	0	35,50	38,50	33,08	0	0	0
Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності $k_{2U}$	$M(k_{2U})$ , %	0,55			0,40			0,24			0,28		
	max, %	0,87			1,11			0,29			0,45		
	min, %	0,47			0,32			0,16			0,15		
	$T1$ , %	0			0			0			0		

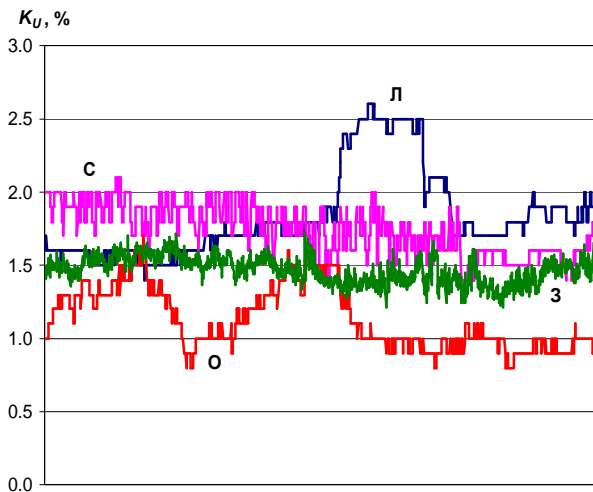


Рис. 4. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги 110 кВ на всіх підстанціях

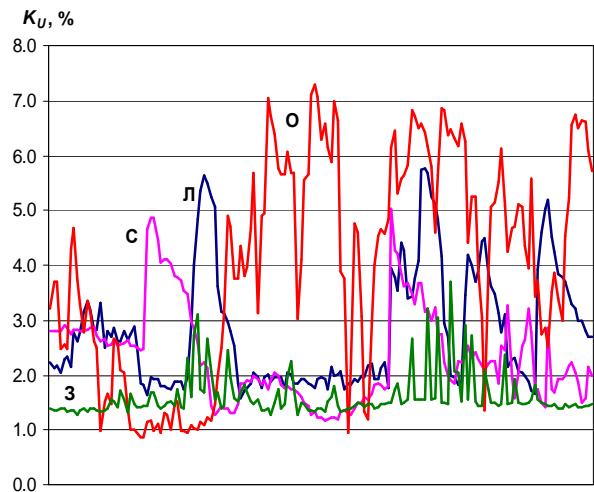


Рис. 5. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги 10 кВ на всіх підстанціях

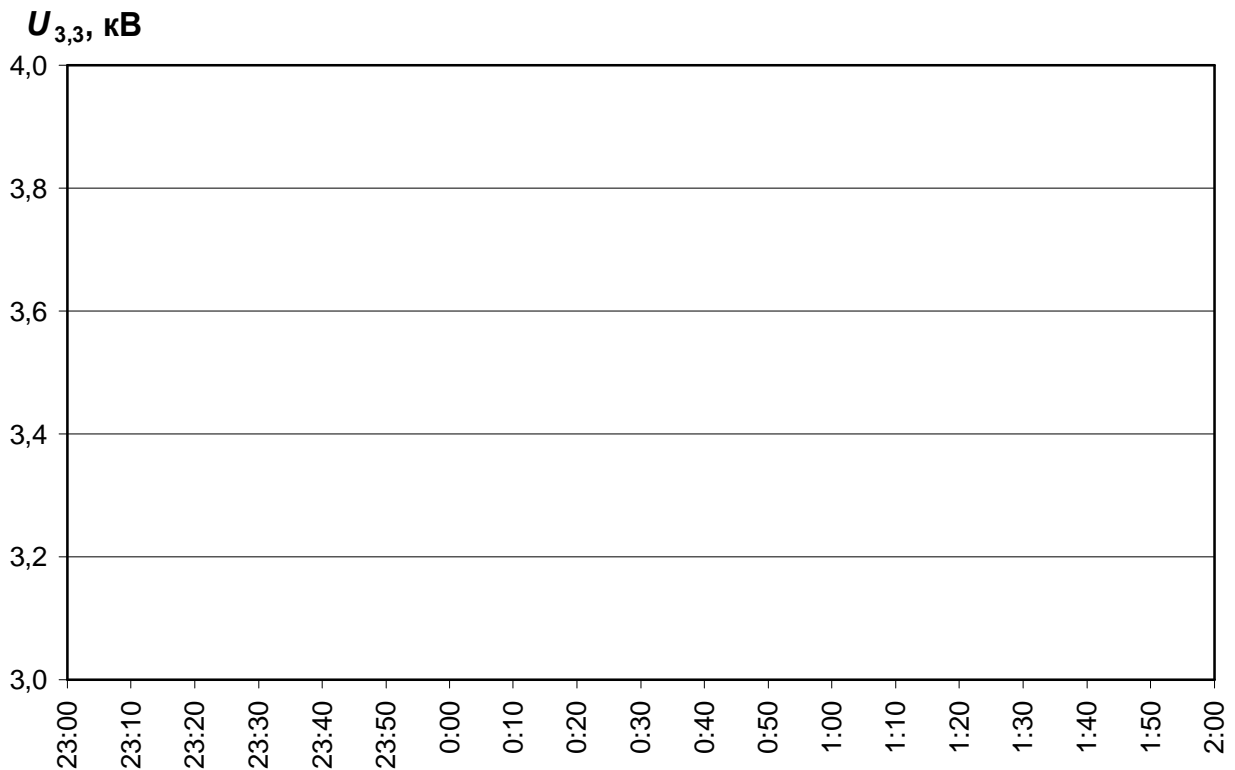


Рис. 6. Рівень напруги на шинах 3,3 кВ підстанції “Л”

На рис. 7 – 11 наведені характерні спектральні складові напруги 3,3 кВ для різних режимів роботи та при відключенні фільтруючого пристрою підстанції Л.

На рис. 12 – 14 наведені характерні спектральні складові напруги 3,3 кВ для різних режимів роботи підстанції С.

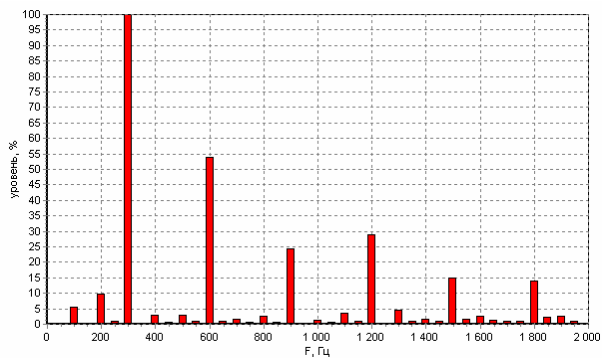


Рис. 7. Спектр напруги 3,3 кВ, випрямний режим 16.11.2007 00:48

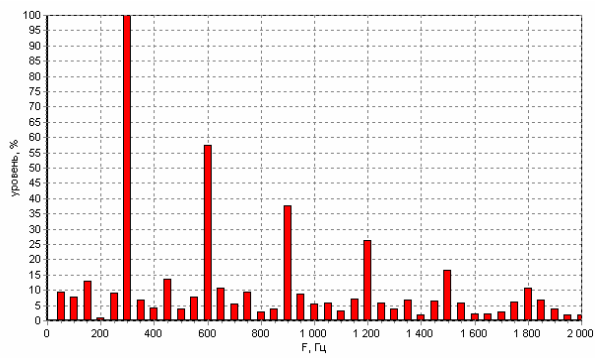


Рис. 8. Спектр напруги 3,3 кВ, інверторний режим 16.11.2007 01:02

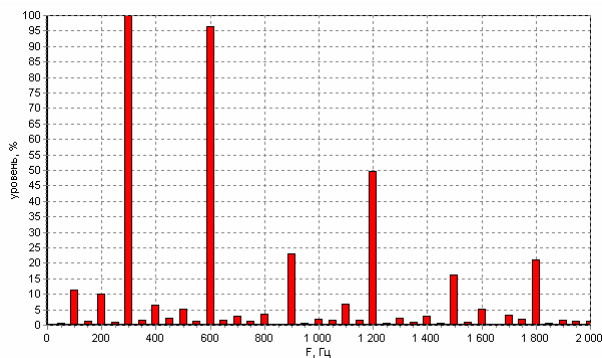


Рис. 9. Спектр напруги 3,3 кВ, випрямний режим 16.11.2007 10:13 (фільтруючий пристрій вимкнений)

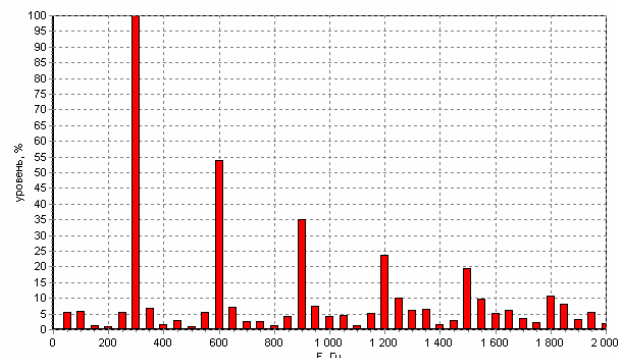


Рис. 10. Спектр напруги 3,3 кВ, інверторний режим 16.11.2007 10:35 (фільтруючий пристрій вимкнений)

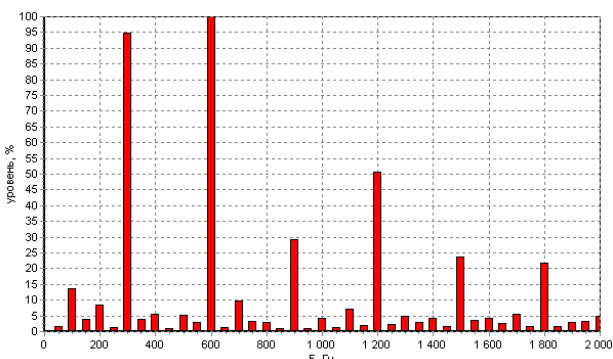


Рис. 11. Спектр напруги 3,3 кВ, інверторний режим 16.11.2007 11:10 (фільтруючий пристрій ввімкнено, 2 ланки)

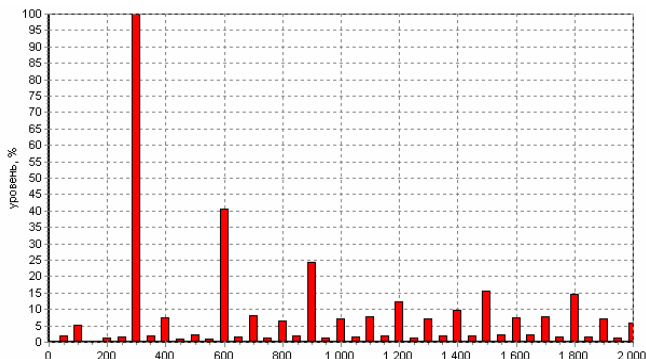


Рис. 12. Спектр напруги 3,3 кВ, випрямний режим 16.11.2007 16:52

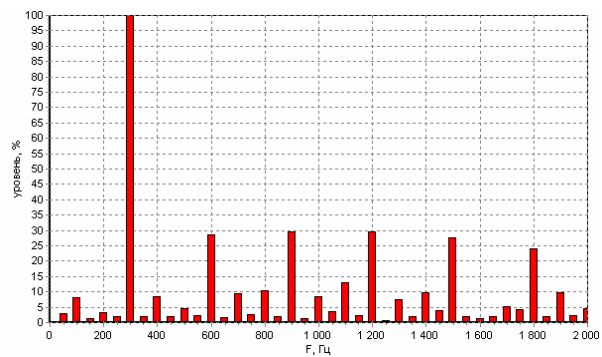


Рис. 13. Спектр напруги 3,3 кВ, інверторний режим 16.11.2007 16:59

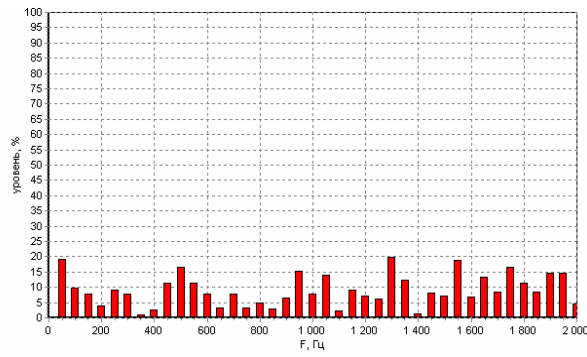


Рис. 14. Спектр напруги 3,3 кВ, вимушений режим 16.11.2007 17:39 (вимкнено тягове навантаження)

## **Висновки**

Проведеними дослідженнями встановлено:

- у первинній мережі 110 кВ, від якої отримують живлення тягові підстанції, рівень напруги вищий за номінальну напругу і, у більшості випадків, виходить за межі гранично-допустимого значення;
- рівень напруги на шинах 10 кВ, від яких живляться тягові трансформатори, також перевищує номінальне значення, але на рівні, в основному, нормально допустимого значення відхилення;
- несиметрія напруги як на шинах 110 кВ, так і на шинах 10 кВ знаходиться в припустимих межах;
- якість електроенергії за показником спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 10 кВ тягових підстанцій з 6-пульсовими випрямлячами не відповідає вимогам стандарту;
- спектральний склад випрямленої напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій містить широкий спектр гармонійних складових, у тому числі канонічних і неканонічних гармонік. При цьому фактично неможливо встановити кореляційний зв'язок між зміною режимів роботи обладнання тягової підстанції та спектрами.

Для поліпшення якості електричної енергії тягової мережі постійного струму і підвищення її електромагнітної сумісності із суміжними пристроями необхідно:

- проводити аналіз навантаження, схем та складу обладнання, приєднаних до шин 110 кВ і 10 кВ, та враховувати його результати при розробці заходів;
- вживати заходи щодо придушення неканонічних і канонічних гармонік із застосуванням пристроїв поліпшення якості електричної енергії, побудованих на іншому принципі дії;
- при зменшенні навантаження доцільно відключати існуючі пасивні згладжуючі фільтри для зменшення втрат енергії в елементах цих фільтрів за умови дотримання необхідного рівня електромагнітної сумісності. Контроль цього рівня може бути здійснений застосуванням сучасного пристрою діагностики згладжуючого пристрою [2].

## **Список літератури**

1. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов ж.д.тр-та. - М.: УМК МПС, 2002.- 638 с.
2. Сиченко В.Г. Діагностування згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму //Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2000. – № 2. – с. 80-84.