

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАСИВНИХ ЗГЛАДЖУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті наведені результати експериментальної оцінки ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму.

В статье приведены результаты экспериментальной оценки эффективности функционирования пассивных сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока.

In this article the results of experimental estimation of functioning efficiency of the passive ripple filters of traction d.c. substations are presented.

Залізничний транспорт відноситься до ключових галузей народного господарства України та посідає перше місце за вантажообігом і друге за пасажирообігом. В умовах нового етапу розвитку ринкових відносин, пов'язаних зі вступом України до Світової організації торгівлі, важливим фактором підвищення ефективності залізничного транспорту залишається економія ресурсів, насамперед палива і електроенергії, витрати на які становлять основну частину експлуатаційних витрат. Питома вага залізничного транспорту в загальному електроспоживанні України становить 3,48 % (6,471 млрд кВт·год за 2007 р.). При цьому на електричну тягу поїздів витрачається 82,78 % (5,357 млрд кВт·год) [1].

На електрифікованих залізницях України, довжина яких на даному етапі складає біля 10 тис. км, що становить близько 43 % загальної довжини залізниць України, розповсюдження одержали дві системи тягового електропостачання:

- постійного струму напругою 3,3 кВ – 4734,89 км;

- змінного однофазного струму частоти 50 Гц напругою 27 кВ – 4935,71 км.

Масова електрифікація залізниць України, а саме Південної, Придніпровської, Донецької і Львівської, на системі постійного струму напругою 3,3 кВ прийшла на середину 50-х років минулого століття. Вибір цієї системи був обумовлений як станом і рівнем розвитку вітчизняної промисловості у загальному плані, так і окремо електротехнічної галузі в частині забезпечення електрифікації необхідним силовим електрообладнанням, матеріалами та електрорухомим складом.

Тягові підстанції (ТП) електрифікованих залізниць постійного струму в основному обладнані випрямними агрегатами, які працюють по 6-пульсових схемах випрямлення змінної напруги: мостовій і дві зворотні зірки з вирівнювальним реактором. За симетричної напруги живильної лінії змінна складова на шинах тягового навантаження містить гармоніки, кратні 300 Гц – 300, 600, 900, 1200 Гц і т.д. Однак, несиметрія фазових напруг живильних ЛЕП приводить до появи гармонік із частотою, кратною 100 Гц, але не кратною 300 Гц – 100, 200, 400 Гц і т.д. У цей час на тягових підстанціях розпочате застосування 12-пульсових випрямлячів, які забезпечують поліпшення техніко-економічних показників роботи системи тягового електропостачання. У реальних умовах перетворення електричної енергії спектральний склад випрямленої напруги 12-пульсового випрямляча також складається з гармонік із частотами 100, 200, 300, 400 Гц і т.д., однак амплітудні значення  $U_{mn}$  зазначених гармонік нижче, ніж при 6-пульсових перетворювачах [2].

Живлення тягової мережі постійного струму в Україні здійснюється від 211 стаціонарних і 7 пересувних тягових підстанцій. З терміном служби більше 30 років працюють 184 стаціонарних і 7 пересувних підстанцій постійного струму. За рівнем напруги зовнішньої енергомережі тягові підстанції постійного струму отримують живлення напругою 6...10 кВ, 35 кВ, 110 кВ і 154...220 кВ. На ТП постійного струму глибокого вводу з первинною напругою 110 кВ і більше використовується, як правило, подвійна трансформація первинної напруги, що обумовлює збільшені втрати електричної енергії. Технічний стан ТП постійного струму відображається доско-

налістю основного силового електрообладнання і, в першу чергу, досконалістю перетворювальних агрегатів. На 211 стаціонарних підстанціях постійного струму працюють 490 перетворювальних агрегатів: 395 шт. 6-пульсних діодних випрямлячів, 95 шт. 12-пульсних випрямлячів і 44 шт. тиристорних інверторів. Понад 50 % перетворювальних агрегатів типів УВКЕ, ПВЕ-3, ПКВВ, ПВКЕ-2 з 6-пульсними схемами випрямлячів відпрацювали свій ресурс та підлягають заміні або модернізації. Планами модернізації господарства електрифікації та електропостачання на 2007 – 2011 рр. передбачається така модернізація з можливим переводом підстанцій у ранг підстанцій глибокого вводу та обов'язковим переходом на 12-пульсні схеми випрямлячів з використанням однократної трансформації первинної напруги [3].

За будь-якої схеми випрямлення напруга, одержувана від перетворювальних агрегатів, є пульсуючою, тобто представляє собою суму постійної і змінної складових, при цьому змінну складову можна представити як суму нескінченного ряду синусоїдальних напруг із частотами, кратними частоті пульсації. Вищі гармонійні складові є основною причиною виникнення перешкод у суміжних лініях зв'язку, радіомовлення, рейкових колах залізничної сигналізації і автоблокування. Таким чином, електрифікація залізничного транспорту системою постійного струму тісно пов'язана із проблемою забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв електропостачання із суміжними електротехнічними комунікаціями. Вирішення цієї проблеми вбачається у зменшенні до припустимого рівня заважаючого впливу системи постійного струму на суміжні пристрої.

Основним заходом щодо зниження заважаючого впливу вищих гармонійних складових випрямленої напруги є встановлення на всіх ТП згладжуючих фільтрів (ЗФ), призначених для максимального зниження амплітуд канонічних гармонік, властивих конкретній схемі випрямлення. На ТП, що використовують 6-пульсову схему випрямлення, рекомендується встановлення дволанцюгових резонансно-аперіодичних ЗФ за схемою ВНДІЗТ або за схемою Західно-Сибірської дороги. При використанні 12-пульсових випрямлячів рекомендуються од-

ноланцюгові аперіодичні і резонансно-аперіодичні ЗФ [4].

Однак, проведеними дослідженнями [5] встановлено, що на залізницях постійного струму застосовуються й інші схеми ЗФ, при цьому:

- одноланцюгові фільтри можуть мати реактор від 3 до 11 мГн, число резонансних контурів від 2 до 7 і ємність аперіодичного ланцюжка 70 (350 мкФ);

- дволанцюгові фільтри можуть виконуватися з індивідуальними реакторами першої ланки й зі сполученими, індуктивність реактора першої ланки 5...11 мГн, другої ланки 3...5 мГн, число резонансних контурів від 1 до 10 і ємність аперіодичного ланцюжка 200...350 мкФ;

- одноланцюгові аперіодичні фільтри мають реактор 5...6,5 мГн і ємність 260...1500 мкФ;

- залежно від схеми фільтра і типу застосовуваних конденсаторів їхня кількість в одному ЗФ коливається від 15 до 200 шт.

Різноманітність схемних рішень при виконанні ЗФ підтверджена нами при виконанні науково-дослідної роботи [6]. Зазначимо, що всі схемні рішення ЗФ, при їх розробці і проектуванні, не враховували можливу несиметрію і несинусоїдальність живлячої напруги. В той же час, у багатьох електричних системах, від яких одержують живлення ТП постійного струму, напруги є в більшому або меншому ступені несиметричними і несинусоїдальними залежно від кількості і потужності однофазних і нелінійних навантажень, підключених до живильної енергосистеми. Несиметрія і несинусоїдальність живлячих напруг спотворює форму кривої випрямленої напруги, а отже, впливає на вибір схеми і параметрів ЗФ. ЗФ, обраний без врахування несиметрії і несинусоїдальності живлячих напруг, може в ряді випадків не забезпечити електромагнітної сумісності тягової мережі й суміжних електротехнічних пристроїв, що призведе до порушення нормальної роботи ліній зв'язку і пристроїв автоблокування [7]. Результати досліджень впливу якості електроенергії на рівень гармонійних складових у відсмоктувальному фідері (ВФ) ТП за різних режимів функціонування і схем ЗФ на Львівській, Донецькій та Південній залізницях представлені на рис. 1 – 16. Коротка характеристика ТП, на яких проводились дослідження, наведена в табл. 1.

## Характеристика тягових підстанцій

ТП	Рівень живлячої напруги, кВ	Схема випрямлення	Наявність інвертора	Схема фільтру	Примітки
Л	110	6	+	2 ланцюги	В роботі одна ланка
С	110	6	+	2 ланцюги	В роботі одна ланка
О	110	6	-	2 ланцюги	В роботі одна ланка
З	35	12	-	1 ланцюг	

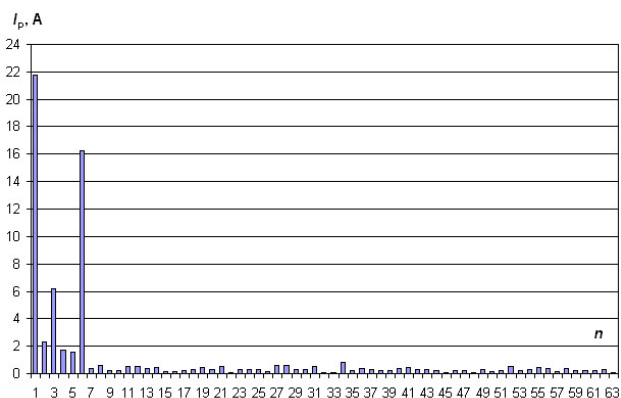


Рис. 1. Гармонійний склад струму ВФ ТП Л (випрямний режим; 16.11.2007 00:48;  
 $K_{UA}=1,8\%$ ;  $K_{UB}=1,7\%$ ;  $K_{UC}=1,6\%$ )

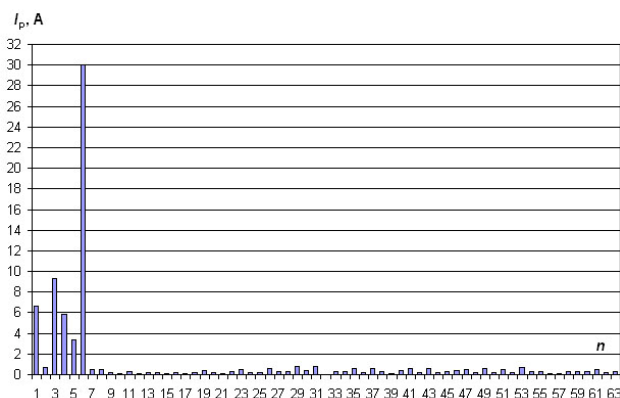


Рис. 2. Гармонійний склад струму ВФ ТП Л (інверторний режим; 16.11.2007 01:02;  
 $K_{UA}=1,8\%$ ;  $K_{UB}=1,8\%$ ;  $K_{UC}=1,8\%$ )

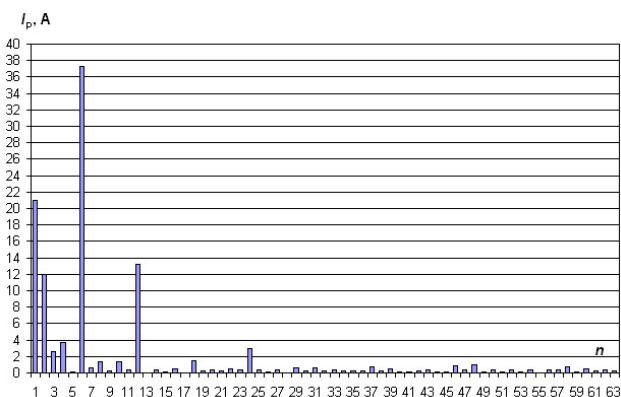


Рис. 3. Гармонійний склад струму ВФ ТП Л (випрямний режим; 16.11.2007 10:13;  
 ЗФ вимкнено;  
 $K_{UA}=1,2\%$ ;  $K_{UB}=1,2\%$ ;  $K_{UC}=1,2\%$ )

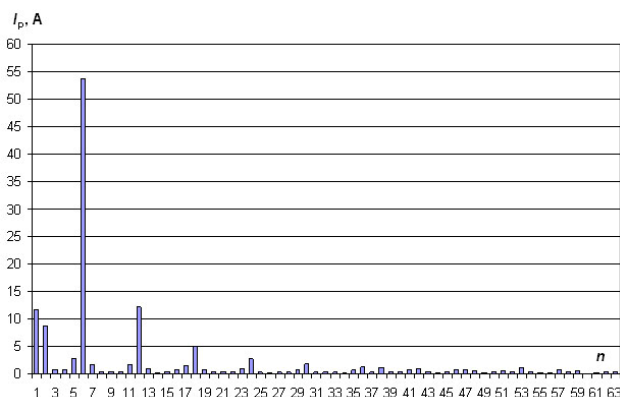


Рис. 4. Гармонійний склад струму ВФ ТП Л (інверторний режим; 16.11.2007 10:35;  
 ЗФ вимкнено;  
 $K_{UA}=1,2\%$ ;  $K_{UB}=1,2\%$ ;  $K_{UC}=1,3\%$ )

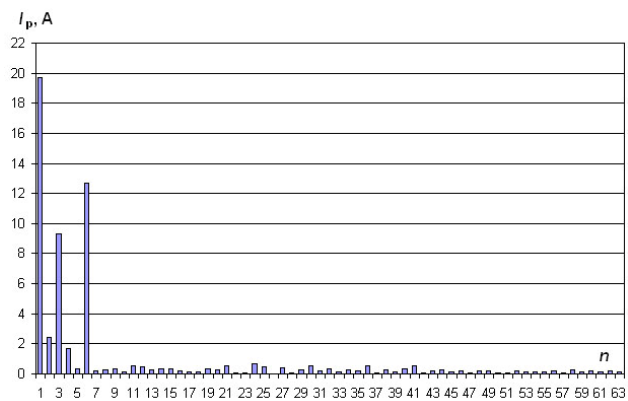


Рис. 5. Гармонійний склад струму ВФ ТП Л  
(інверторний режим; 16.11.2007 11:10;  
ЗФ включено 2 ланки;  
 $K_{UA}=1,2\%$ ;  $K_{UB}=1,5\%$ ;  $K_{UC}=1,3\%$ )

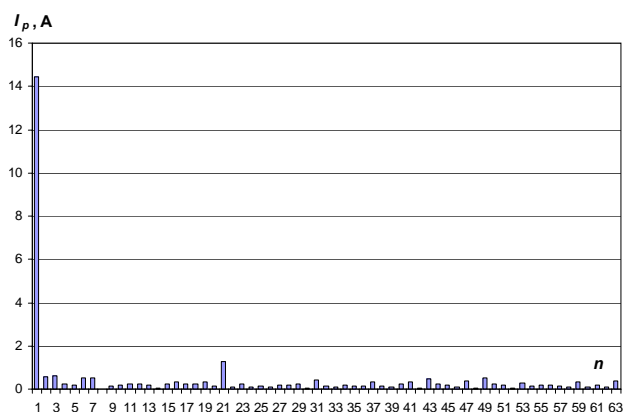


Рис. 6. Гармонійний склад струму ВФ ТП С  
(випрямний режим; 16.11.2007 16:52;  
 $K_{UA}=2,81\%$ ;  $K_{UB}=2,7\%$ ;  $K_{UC}=2,78\%$ )

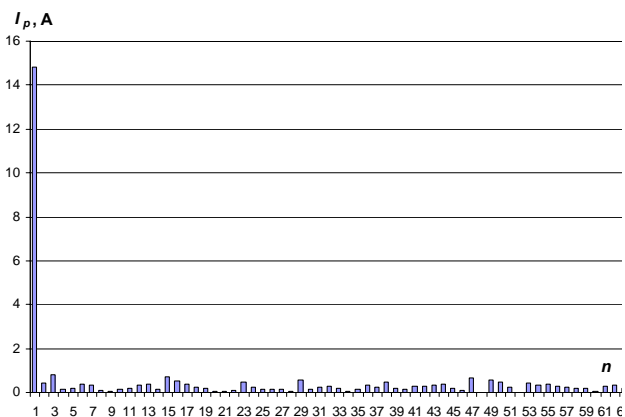


Рис. 7. Гармонійний склад струму ВФ ТП С  
(інверторний режим; 16.11.2007 16:59;  
 $K_{UA}=2,81\%$ ;  $K_{UB}=2,72\%$ ;  $K_{UC}=2,83\%$ )

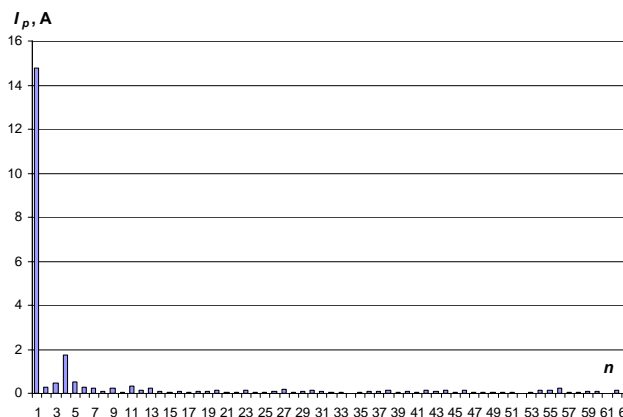


Рис. 8. Гармонійний склад струму ВФ ТП С  
(вимушений режим; 16.11.2007 17:39;  
 $K_{UA}=1,27\%$ ;  $K_{UB}=1,17\%$ ;  $K_{UC}=1,14\%$ )

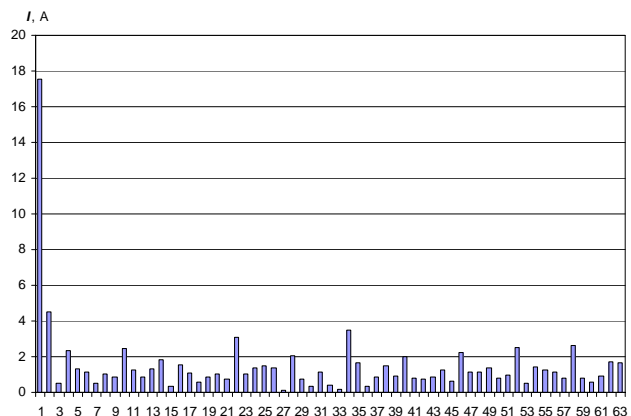


Рис. 9. Гармонійний склад струму ВФ ТП О  
(21.11.2007, 08:31; ЗФ включено;  
 $K_{UA}=3,66\%$ ;  $K_{UB}=3,71\%$ ;  $K_{UC}=3,50\%$ )

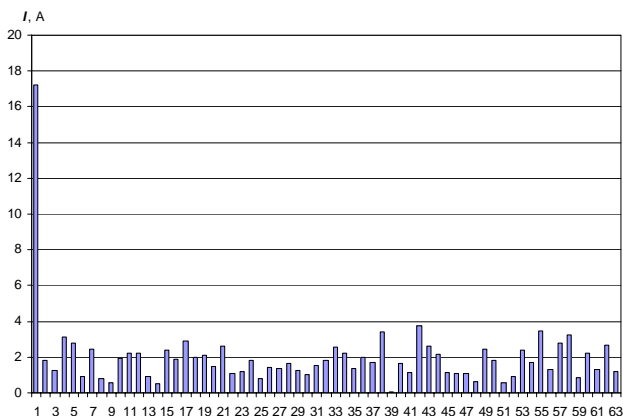


Рис. 10. Гармонійний склад струму ВФ ТП О  
(21.11.2007, 08:35; ЗФ включено;  
 $K_{UA}=3,7\%$ ;  $K_{UB}=3,72\%$ ;  $K_{UC}=3,51\%$ )

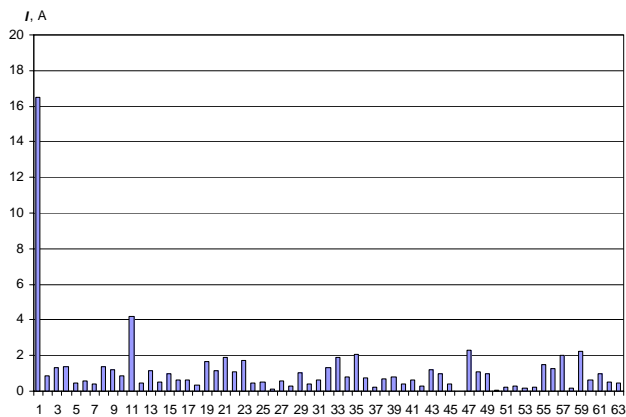


Рис. 11. Гармонійний склад струму ВФ ТП О  
(20.11.2007, 15:02; 3Ф виключено;  
 $K_{UA}=5,72\%$ ;  $K_{UB}=5,8\%$ ;  $K_{UC}=5,68\%$ )

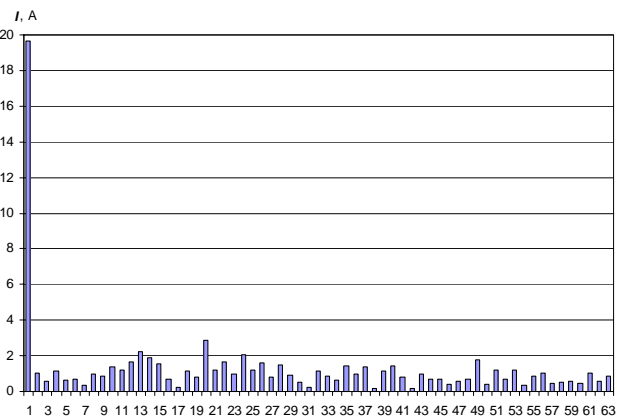


Рис. 12. Гармонійний склад струму ВФ ТП О  
(20.11.2007, 20:11; 3Ф виключено;  
 $K_{UA}=5,59\%$ ;  $K_{UB}=5,72\%$ ;  $K_{UC}=5,48\%$ )

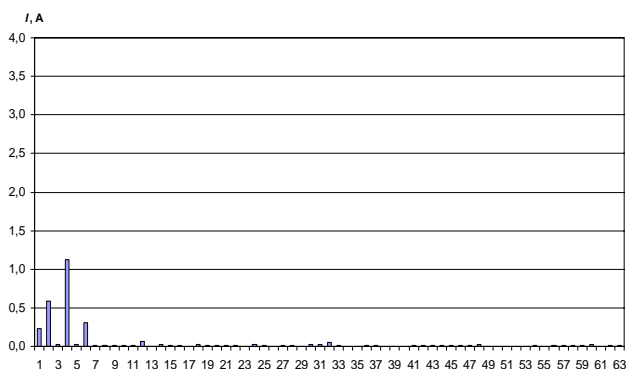


Рис. 13. Гармонійний склад струму ВФ ТП З  
(12.03.2008, 09:25; 3Ф включено;  
 $K_{UA}=1,6\%$ ;  $K_{UB}=1,51\%$ ;  $K_{UC}=1,41\%$ )

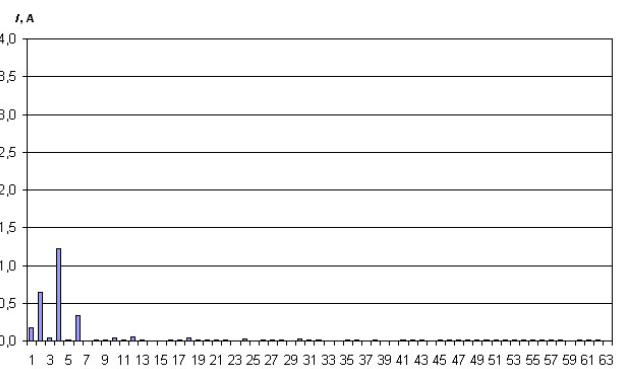


Рис. 14. Гармонійний склад струму ВФ ТП З  
(12.03.2008, 12:00; 3Ф включено;  
 $K_{UA}=1,44\%$ ;  $K_{UB}=1,02\%$ ;  $K_{UC}=0,83\%$ )

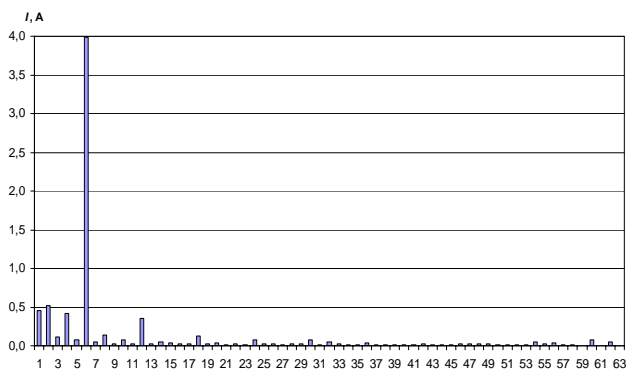


Рис. 15. Гармонійний склад струму ВФ ТП З  
(12.03.2008, 10:07; 3Ф виключено;  
 $K_{UA}=2,37\%$ ;  $K_{UB}=2,41\%$ ;  $K_{UC}=2,31\%$ )

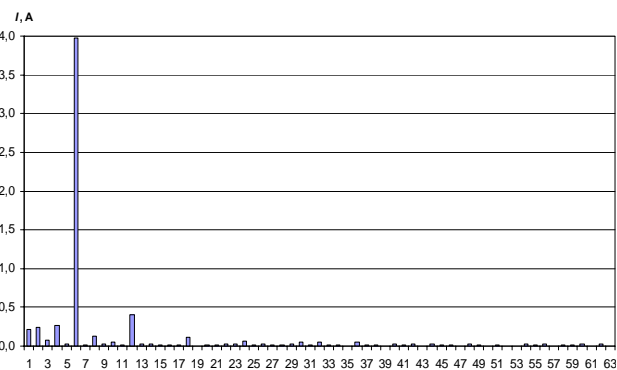


Рис. 16. Гармонійний склад струму ВФ ТП З  
(12.03.2008, 10:35; 3Ф виключено;  
 $K_{UA}=2,80\%$ ;  $K_{UB}=2,87\%$ ;  $K_{UC}=2,78\%$ )

Якість роботи 3Ф оцінюється вимірюванням рівнів еквівалентної заважаючої напруги до і після 3Ф з подальшим визначенням коефіцієнту згладжування  $K_{згл}$  3Ф як відношення рівнів еквівалентної заважаючої напруги  $U_{Езав1}$  (до

згладжування) і  $U_{Езав2}$  (після згладжування). Зниження рівня працездатності 3Ф оцінюється порівнянням визначеного  $K_{згл}$  з його нормованим значенням [8]. На сьогоднішній день на ТП постійного струму контроль якості фун-

кціонування ЗФ фактично відсутній. Для оцінки енергетичної ефективності функціонування ЗФ в різних режимах нами проводився розра-

хунок потужності спектру  $S_{ЗФ}$  за методикою [9, с. 318-319]. Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку потужності спектру

№ рисунок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$S_{ЗФ}, \text{кВт}$ $10^{-3}$	785	1088	2187	3318	651	214	226	223	446	531	335	463	2	2	17	16

Аналіз статистичного матеріалу та даних, наведених у табл. 2. дозволяє зробити наступні висновки:

1. Гармонійний спектр струму ВФ залежить не тільки від схеми випрямлення, схеми і режиму роботи ЗФ, а й від режиму напруги (і, певно, роботи і виду навантаження) живлячої енергосистеми, в тому числі залежно від регіону.

2. Неможливо встановити кореляційний зв'язок між впливом режиму роботи ТП (випрямлення або інвертування) на коефіцієнт несиметрії живлячої напруги, в тому числі при ввімкненому або відімкненому ЗФ (західний регіон). При цьому при погашенні ТП (вимушений режим)  $K_U$  зменшується більш ніж у 2 рази.

3. При відімкненому ЗФ (східний регіон)  $K_U$  зростає в середньому більш ніж у 1,5 рази при шестипульсовій схемі випрямлення і в 1,5...2,5 рази (а по окремих фазах і більше 3) при 12-пульсовій схемі.

4. Потужність спектру при інверторному режимі роботи ТП більша, ніж при випрямному режимі як при ввімкненому, так і вимкненому ЗФ (західний регіон).

5. Потужність спектру при ввімкненому ЗФ більша (!), ніж при вимкненому при 6-пульсовій схемі і менша на порядок при ввімкненому ЗФ у порівнянні з вимкненим ЗФ при 12-пульсовій схемі.

6. Потужність спектру при 12-пульсовій схемі більш ніж в 200 разів менша ніж при 6-пульсовій (східний регіон) і більш ніж у 400 разів менша при 6-пульсовій схемі (західний регіон).

Можна зробити висновок, що підвищення ефективності функціонування ЗФ, та і самої ТП для забезпечення необхідного рівня ЕМС повинне базуватись не тільки на режимних та схемотехнічних рішеннях, в тому числі при введенні в дію нового обладнання, а й розробці та впровадженні сучасних силових активних фільтрів.

## БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2007 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2008. – 102 с.
2. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский и др.; под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
3. Концепція будівництва та оновлення тягових підстанцій [Текст] / Укрзалізниця. – К.: Головне управління електрифікації та електропостачання, 2005. – 16 с.
4. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму [Текст] / І. В. Анохов та ін. // Заліз. трансп. України. – 2000. – № 2. – С. 10-12.
5. Разработать и внедрить информационно-управляющий комплекс с применением микропроцессоров. Раздел: Разработка технического задания на программное и техническое обеспечение задачи «Контроль фильтр-устройства» [Текст] : отчет о НИР 144/87 / МИИТ. – М., 1987. – 30 с. – № ГР 01.87.0053842.
6. Дослідження показників якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму та розробка рекомендацій [Текст] : звіт по НДР 23.52.07.08 / ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – 63 с. – № ДР 0107U010377.
7. Скоков, Р. Б. Снижение влияния тяговой сети постоянного тока на автоблокировку с тональными рельсовыми цепями [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Б. Скоков. – Омск, 2004. – 18 с.
8. Сиченко, В. Г. Діагностування згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму [Текст] / В. Г. Сиченко, М. П. Бадьор, В. А. Зубенко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2000. – № 2. – С. 80-84.
9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.

Надійшла до редколегії 24.09.2008.