

УДК 621.331:621.311.4

М. О. КОСТІН – д.т.н., проф., кафедра «Електротехніка та електромеханіка»,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна

О. Г. ШЕЙКІНА – к.т.н., доцент, кафедра «Електротехніка та електромеханіка»,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, shog73@mail.ru

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД НАПРУГИ І СТРУМУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЛІНІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Постановка задачі

Як відомо, норми якості електроенергії (ЯЕ), що встановлені діючим ГОСТ 13109 97 [1], являються також рівнями електромагнітної сумісності. І в той же час, основним фактором, який визначає ЯЕ, є рівень гармонійного складу напруг і струмів у вузлах приєднання навантаження. Системи електричної тяги (СЕТ) в цій проблемі не є виключенням.

Із 490 випрямних установок, що працюють на 211 стаціонарних ТП електрифікованих ділянок України, 395 з них – це 6-пульсні та 95 – 12-пульсні діодні, і лише 44 – тиристорні [2, 3]. Тому, в цій роботі було досліджено 5 підстанцій з 6-пульсними діодними випрямлячами. На рис. 1 зображена якісна структура схеми досліджуваної електрифікованої ділянки, на якій: ТМ – тягова мережа; ЛЕП – лінія електропередачі зовнішнього електропостачання.

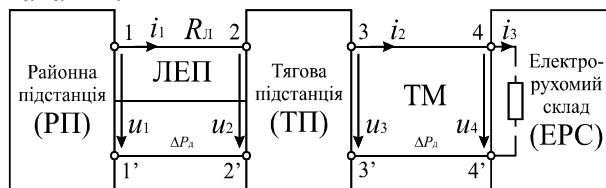


Рис. 1. Якісна структурна схема досліджуваної електрифікованої ділянки

Для електричної мережі зовнішнього електропостачання СЕТ постійного струму являє собою потужне нелінійне, динамічне, часто різкозмінне навантаження. При цьому характерною особливістю цього наван-

таження є явне переважання активно-індуктивного його характеру, що й призводить до споживання нею великого об'єму реактивної потужності [4, 5]. Різкозмінний характер навантаження суттєво впливає на відхилення та коливання напруги в точках 2-2' (рис. 1), а нелінійність і ТП, і електро-рухомого складу (ЕРС) призводить до спотворення форми струму відносно напруги, тобто виникненню струмів вищих гармонік та інтергармонік. Оскільки, у відповідності з ГОСТ 13109-97 [1], вимоги до ЯЕ вводяться відносно точок (вузлів) загального приєднання споживачів, тому при аналізі процесів у системі зовнішнього електропостачання системи електротяги такими точками є точки 2-2', часова фіксація напруг і струмів відносно яких і була здійснена.

Аналіз публікацій з проблеми, що вирішується

В останні 10...15 років дослідження гармонійного складу тягових напруг і струмів СЕТ постійного струму знову активізувались. Зокрема, в [6] приведено порівняння спектрального складу вихідної напруги тягових підстанцій з 6-ти і 12-пульсними діодними випрямлячами. Одночасно встановлено, що в спектрі фазного струму районної ЛЕП – 10 кВ при роботі ТП з 6-пульсним випрямлячем виділяються за своїми значеннями 17-а і 19-а гармоніки, які складають 7...10 % від першої гармоніки.

Аналіз спектрального складу низькочастотних пульсацій вихідної напруги теж 6-

пульсних, але керованих (тиристорних), випрямлячів докладно вивчено в дисертаційній роботі [7].

Неканонічні гармоніки вхідних струмів ТП досліджено в роботах [8, 9]. Встановлено, що в зазначених струмах переважають 1, 5, 7 і 11-та гармоніки.

Методи спектрального аналізу фідерних і на ЕРС напруг і струмів у випадку стохастичного характеру їх зміни викладено в [10, 11].

Найбільш докладно існуючий стан ЯЕ та рівнів електромагнітної сумісності та приєднаннях ТП системи постійного струму проаналізовано в дисертаційній роботі [12]. Однак при цьому основну увагу автор приділив оцінці власне рівню напруги в первинних мережах (10, 35 і 110 кВ), числових характеристик несиметрії та показників спотворення напруги. За нашою думкою, гармонійний склад напруги, і тим більше струму, в лініях зовнішнього електропостачання досліджено недостатньо.

Мета роботи – дослідження спектрального складу та енергетичних показників напруги і струму в первинних (районних) електричних мережах електропостачання тягових підстанцій з 6-пульсними випрямлячами.

Методи і прилади експериментальних досліджень

Реєстрацію (запис) часових залежностей напруг і струмів здійснювали на елементах досліджуваних ділянок (рис. 1) Придніпровської залізниці відповідно спеціально розробленої програми.

Синхронне осцилографування миттєвих величин фазних напруги $u_1(t)$ і струму $i_1(t)$ на виході (точки 1-1', рис. 1) РП, що живить ТП і $u_2(t)$, $i_2(t)$ на вході ТП (точки 2-2') виконували за допомогою двопромінного електронного осцилографа С1-93 з класом точності 2. При цьому для запису осцилограм струму вмикали 1-й канал приладу паралельно до безіндуктивного шунта (1,5 А/75 мВ), який був увімкнений послі-

довно з вторинною обмоткою трансформатора струму фази «С» живильної мережі РП. Другий канал осцилографа використовували для одночасного запису фазної напруги, який вмикали паралельно до затискачів вторинної обмотки вимірювального трансформатора напруги, тобто вмикали на напругу фази «С».

Часові залежності зміни діючих значень напруги $U_1(t)$, $U_2(t)$ і струму $I_1(t)$ на виході РП записували за допомогою переносних самописців, зі швидкістю запису 100...300 мм/год, магнітоелектричної системи з випрямлячем і класом точності 1,5. Для отримання реєстрограм напруги використовували ампервольтметр типу Н339 за № 01367, який вмикали паралельно затискачам вторинної обмотки трансформатора напруги (до фази «С»). Синхронну реєстрацію струму здійснювали приладом того ж типу, але за № 00155, який вмикали послідовно з вторинною обмоткою трансформатора струму фази «С» мережі РП.

Гармонійний склад напруги і струму

Згідно з рядом нормативних документів, основним фактором, який визначає якість параметрів електричної енергії, досягнення в питанні електромагнітної сумісності, закон керування пристроями компенсації реактивної потужності тощо є рівень гармонійного складу напруг і струмів у вузлах приєднання навантаження. Тому виконаємо це для точок 2-2' (рис. 1) для ТП з 6-пульсною схемою діодного випрямлення. Такою ТП була вибрана ЕЧЕ-14 «Горяіново» з вхідною напругою 6 кВ. Вибір цієї ТП обумовлений наступними причинами: великими значеннями тягового струму в зв'язку з наявністю підйому в профілі шляху ряду фідерних зон; високою вантажонапруженістю й тим самим значними коливаннями тягового струму. В нормальному режимі вона отримує живлення від РП «Заводська» (Дніпрообленерго) через дві трипровідні кабельні лінії (кабель АСБ-3-240)

довжиною 735 м (Л-15) та 727,3 м (Л-3) відповідно.

На рис. 2, а приведені осцилограми одного періоду мережевої напруги $u_2(t)$ і струму $i_1(t)$ фази «А» (згідно рис. 1) на вході № 1 лінії Л-15 цієї ТП в режимі тягового навантаження. Як випливає із цього рисунка, і напруга, і струм є суттєво несинусоїдними, при цьому перша гармоніка напруги випереджує першу гармоніку струму за фазою на 6 електричних градусів. Спотворення струму зрозуміле і обумовлене нелінійністю елементів СЕТ (в основному випрямлячів та колекторних двигунів). А, як відомо, несинусоїдність струму призводить до спотворення напруги. Підтвердженням такого впливу струму служать осцилограми на рис. 2, б: при струмі холостого ходу випрямного агрегату, напруга має майже неспотворений синусоїдний характер.

Основний внесок в спотворення кривої струму вносять гармоніки 2, 4, 5, 6, 7 (рис. 3). Ті гармоніки, значення коефіцієнта k -тої гармонійної складової струму

$K_{I(n)} = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100\%$ яких більше одиниці, приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів k -тої гармонійної складової струму та інтегрального показника гармонійного складу струму

Коефіцієнти k -тої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %						ТНДІ, %
k -та гарм.	2	4	5	6	7	
$K_{I(n)}$, %	5	3	13,5	4,7	6,2	17,1
k -та гарм.	8	11	12	13	18	
$K_{I(n)}$, %	2	1,8	1,6	1,2	1,1	

Як випливає із табл. 1, складова вхідного струму ТП, яка обумовлена лише тяговим електропостачанням, містить в своєму складі відносно велику кількість гармонік, які за своїм рівнем співрозмірні з рівнем першої гармоніки.

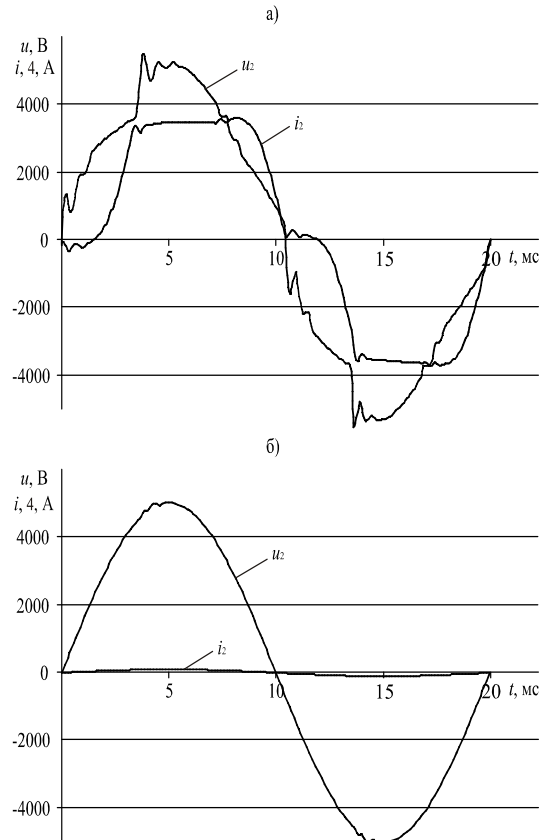


Рис. 2. Осцилограми вхідної напруги та струму до ТП «Горяїново»: а) в режимі тягового навантаження; б) в режимі холостого ходу

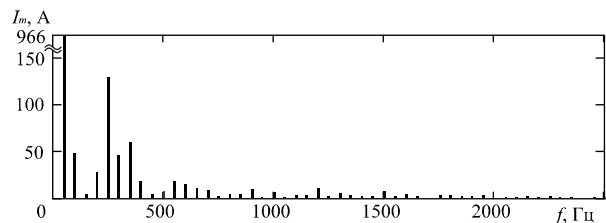


Рис. 3. Спектральний склад вхідного струму ТП «Горяїново»

При діючому значенні вхідного струму $I_1=700$ А інтегральний показник гармонійного складу струму, згідно зі стандартом IEEE 519-1992, який визначається коефіцієнтом гармонік THD – Total Harmonic Distortion [13]

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{49} (I^{(k)})^2}}{I^{(1)}} \cdot 100\%$$

склав 17,1 %, що перевищує норму.

В режимі тягового навантаження форма кривої напруги відрізняється від синусоїди в основному за рахунок гармонік 2, 5, 7, 11 (рис. 4). Їх коефіцієнти k -тої гармонійної складової напруги, згідно з ГОСТ 13109-97,

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} 100\%$$

подано на рис. 5. Ті гармоніки, значення k -тої гармонійної складової напруги яких перевищують норми згідно [1] та їх допустимі значення для даної напруги, приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів k -тої гармонійної складової вхідної напруги до ТП «Горяїново», які перевищують норму

k -та гарм.	2	4	5	6	7
Знач. $K_{U(n)}$, %	4,06	1,46	5,53	2,04	3,89
Норм. доп. знач., %	1,5	0,7	4	0,3	3
Гранич. доп. знач., %	2,25	1,05	6	0,45	4,5
k -та гарм.	8	9	10	11	12
Знач. $K_{U(n)}$, %	1,24	0,60	1,07	2,03	1,24
Норм. доп. знач., %	0,3	0,5	0,3	2	0,2
Гранич. доп. знач., %	0,45	0,75	0,45	3	0,3
k -та гарм.	14	15	16	18	20
Знач. $K_{U(n)}$, %	0,87	0,99	1,11	1,29	0,74
Норм. доп. знач., %	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Гранич. доп. знач., %	0,3	0,45	0,3	0,3	0,3
k -та гарм.	21	22	24	25	26
Знач. $K_{U(n)}$, %	1,39	1,03	0,88	1,12	0,85
Норм. доп. знач., %	0,2	0,2	0,2	1	0,2
Гранич. доп. знач., %	0,3	0,3	0,3	1,5	0,3
k -та гарм.	28	30	31	32	33
Знач. $K_{U(n)}$, %	0,85	0,52	1,43	0,86	1,82
Норм. доп. знач., %	0,2	0,2	0,63	0,2	0,2
Гранич. доп. знач., %	0,3	0,3	0,94	0,3	0,3

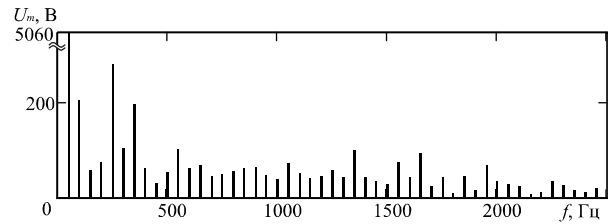


Рис. 4. Спектральний склад вхідної напруги до ТП «Горяїново»

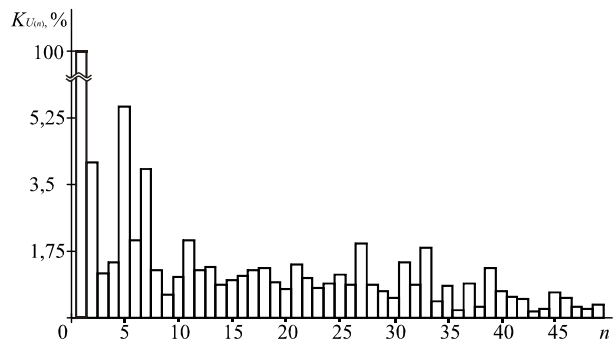


Рис. 5. Значення коефіцієнтів k -тої гармонійної складової вхідної напруги до ТП «Горяїново»

Сумарний коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги, згідно з виразом ГОСТу 13109-97

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} U_{(n)}^2}{U_{(1)}^2}} 100\%$$

склав 10,5 %, що перевищує як нормально допустиме значення 6 %, так і гранично допустиме значення 8 % для цього рівня напруги.

Енергетичні показники

Суттєву несинусоїдність напруги і струму обумовлює той факт, що СЕТ постійного струму, тобто система «ТП+ТМ+ЕРС», як навантаження, являє собою споживач двох складових повної потужності S : активної P та неактивної (або реактивної по Фризе) Q_ϕ . Для їх визначення використаємо вирази, які отримані в [14]. Значення зазначених вище величин в кожній фазі склали: $S=2497$ кВА; $P=2430$ кВт; $Q_\phi=575$ квар.

Коефіцієнт потужності системи електротяги $\lambda=0,973$, а коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\phi=0,273$. Як бачимо, коефіцієнт потужності не менше нормативного зна-

чення, що дорівнює 0,92...0,95. За аналогією, фактична величина $\text{tg}\varphi$ також не перевищує нормовану, що становить 0,25. Аналізуючи отримані величини, цікавим є той факт, що при таких значеннях λ та $\text{tg}\varphi$, що задовольняють вимогам нормативної документації, значення K_U та K_I не задовольняють стандарту [1].

Висновки

1. На вводах дослідженої ТП з входною напругою 6 кВ та 6-пульсним випрямлячем входні напруга та струм є суттєво несинусоїдними з $\varphi^{(1)} = +6^\circ$;
2. Крива напруги відрізняється від синусоїди в основному за рахунок гармонік 2; 5; 7 та 11; значення їх коефіцієнтів відповідно складають (%): 4,06; 5,53; 3,89 та 2,03, що перевищує їх нормативно допустимі величини. Сумарний коефіцієнт спотворення напруги склав 10,5 % при нормально допустимому 6 % і граничному – 8 %.
3. Основний вклад в спотворення струму вносять гармоніки 2; 4; 6 і 7 з коефіцієнтами відповідно (%): 5,0; 3,0; 4,7 і 6,2. Інтегральний показник гармонійного складу струму THD_I при входному $I_I=700$ А складає 17,1 %, що перевищує нормативне значення.

Бібліографічний список

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Издание официальное. Мн. – Издательство стандартов. – 1998. – 30 с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2008 році. – К.: «Укрзалізниця», 2009.
3. Сиченко, В. Г. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих

- фільтрів тягових підстанцій [Текст] / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 25. – С. 63-68.
4. Fryse, S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusstormigen rerlaf von Strom und Spannung / S. Fryse // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. –Т. 25. – S. 596-599; Т. 26. – S. 625-627; Т. 29. – S. 700-702.
5. Костин, Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги [Текст] / Н. А. Костин // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 34. – С. 73-76.
6. Шалимов, М. Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / М. Г. Шалимов // – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
7. Пекер, Б. Н. Компенсация низькочастотных пульсаций вихідної напруги 6-пульсних керованих випрямлячів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук [Текст] / Б. Н. Пекер. – К., 2004. – 20 с.
8. Щербак, Я. В. Подавлення неканонічних гармонік мережійних струмів тягового випрямляча за допомогою резонансних фільтрів [Текст] / Я. В. Щербак, К. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ – 2006». – 2006. – Ч. 5. – С. 91-93.
9. Ягуп, К. В. Подавлення неканонічних гармонік входних струмів тягової підстанцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.09 «Електротранспорт» [Текст] / К. В. Ягуп. – Харків, 2008. – 20 с.
10. Саблин, О. И. Спектральный анализ случайных функций тягового тока и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава [Текст] / О. И. Саблин // Вісник ДНУЗТ. – Д.: 2007. – Вип. 15. – С. 41-47.
11. Петров, А. В. Методи спектрального аналізу випадкових технологічних коливань напруги та струму фідера ТП постійного струму [Текст] /

- А. В. Петров // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 34. – С. 77-80.
12. Сиченко, В. Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.22.09 «Електротранспорт» [Текст] / В. Г. Сиченко. – Дніпропетровськ, 2011. – 39 с.
13. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский // Электротехника. – 1998. – №3. – С. 10-17.
14. Костін, М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними електроенергетичними процесами [Текст] / М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Темат. випуск. ПСЕ. Частина 6, 2006. – С. 3-8.

Ключові слова: спектральний склад, енергетичні показники, лінія зовнішнього електропостачання, тягова підстанція, напруга, струм, несинусоїдний, вхідний, гармоніка, нормативний, показник, випрямляч.

Ключевые слова: спектральный состав, энергетические показатели, линия внешнего электроснабжения, тяговая подстанция, напряжение, ток, несинусоидальный, входной, гармоника, нормативный, показатель, выпрямитель.

Keywords: the harmonic content, energy indicators, external power supply line, the tractive substation, voltage, current, non-sinusoidal, input, harmonic, standard, value, rectifier.

Рецензенти:
д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабець,
д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 11.03.2015.
Прийнята до друку 26.03.2015.