

УДК 621.321

Т. М. СЕРДЮК – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru,
ORCID: 0000-0002-2609-4071

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ І АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СПОЖИВАЧІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Вступ

Для збільшення обсягу роботи електричних станцій, районних та тягових підстанцій (РП та ТП), забезпечення пропуску великовагових поїздів застосовується електрична тяга. Як відомо, використання тягових мереж змінного струму найбільше доцільно. Але поряд з багатьма позитивними якостями система змінного однофазного струму має ряд істотних недоліків, а саме значний електромагнітний вплив на суміжні лінії залізничної автоматики та зв'язку. Тяговий струм впливає на сигнальний струм пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) і струм автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС), оскільки при прийомі тягового сигналу як корисного виникають помилкові спрацьовування пристроїв СЦБ, а це може привести до такої небезпечної відмови, як помилкова вільність рейкового кола.

Актуальність роботи. Зі збільшенням перевезень збільшується й тяговий струм, а відповідно і електромагнітний вплив на інші кола. Отже зі збільшенням використання електричної тяги, потрібно вирішити задачу захисту суміжних електричних ліній від небажаного впливу, який є заважаючим або небезпечним. На сьогодні вимоги до електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з рейковими колами значно зросли в зв'язку з широким використанням на залізничному транспорті нових науково-технічних рішень, пов'язаних з використанням мікропроцесорної техніки. Застосування схем керування, пристроїв регулювання тяги і гальмування, інформацій-

них шин, що охоплюють усі системи рухомого складу, диспетчерської та електричної централізації, побудованих на мікропроцесорній базі, ставить особливо високі вимоги до стійкості цих компонентів стосовно сторонніх електромагнітних полів. Рівень завад, які виникають внаслідок роботи сучасної перетворювальної техніки, що використовується для управління роботою локомотиву, значно зріс, тому при комутації виникають коливання значних потужностей з високою тактовою частотою і токовими імпульсами великого значення. На залізничному транспорті виникають додаткові складності при забезпеченні електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з пристроями СЦБ через високу щільність компонування устаткування на рухомому складі, де силове обладнання і системи керування рухом поїздів розташовуються поруч. Трасування ліній зв'язку і СЦБ ведеться паралельно контактній мережі. Тому вирішення проблем електромагнітної сумісності пристроїв СЦБ з системою тягового електропостачання і аналіз параметрів якості електричної енергії тягових підстанцій, від яких живляться не тільки тягові, а й залізничні нетягові і промислові, житлово-комунальні споживачі, розташовані поблизу тягових підстанцій, є актуальною задачею.

Мета – оцінити енергоефективність і сучасний технічний стан залізниць України змінного струму, їх електромагнітну сумісність з нетяговими споживачами, зокрема рейковими колами і системою АЛС, встановленою на рухомому складі.

Предмет дослідження – облік електричної енергії і параметрів якості електричної енергії на тяговій підстанції змінного струму.

Для вирішення поставленої задачі необхідно: класифікувати споживачів тягових підстанцій, оцінити параметри якості електричної енергії, яка надходить на шини ТП і передається споживачам; оцінити електромагнітну сумісність споживачів ТП.

Напрямок науково-технічних досліджень відповідає стратегії розвитку інфраструктури України: програма «Drive Ukraine 2030» [1]. Планується провести інтеграцію транспорту України до європейської та світової транспортної систем шляхом впровадження новітніх технологій, розвитку інфраструктури і участі в проекті «Новий шовковий шлях». Це передбачає оновлення локомотивів і вагонного парку, збільшення швидкості руху до 150 км /год, застосування на сполученні Київ-Одеса, Київ-Львів, Київ – Харків, Київ – Дніпро колії європейського стандарту, співпраця із компаніями General Electric, Bombardier, Greenbrier і ставить певні вимоги до якості електричної енергії.

Реформування галузі інфраструктури йде пліч о пліч з реформуванням електроенергетики України [2] і пред'являє нові жорсткі ринкові вимоги до споживачів. Залізничний транспорт повинен гармонійно вписатися в нові умови взаємовідносин з енергетикою.

Системи тягового електропостачання залізниць України

На сьогоднішній день в світі електрифікована тягою постійного струму майже 30% від всіх залізниць, а змінного струму – 40 %. В Україні електрифіковано 47 % від усіх залізниць. Більш детальний аналіз ступеню електрифікації залізничних доріг України і обсягу поїзної роботи наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Аналіз електрифікації залізниць України і обсягу перевізної роботи

Залізниця України	Загальна довжина, км			Обсяг перевезень електрифікованими залізницями, %
	Всього	електрифіковані		
		змінним струмом 25 кВ 50Гц	постійним струмом 3кВ	
Південно-Західна	4779.4	1682	-	70
Південна	3000	783	195	45.6
Одеська	4200	1708	1.6	60
Львівська	4521	2395	874.9	56.1
Придніпровська	3275	-	3046	80
Донецька	1616	-	639	56,1

Таблиця 2

Розподіл відмов пристроїв залізничної автоматики за вини служби «Е» по залізницях України

Залізниця України	Причина відмови, %		
	вимкнення електроенергії	Перепади напруги	Інше
Південно-Західна	61,9	15,8	22,3
Південна	99,0	1,0	-
Одеська	60,0	13,0	27,0
Львівська	87,6	10,1	2,3
Придніпровська	57,9	15,8	26,3
Донецька	78,5	12,3	9,2

В середньому якісний склад відмов в пристроях залізничної автоматики за вини служби електропостачання залізниць можна охарактеризувати так: 86 % відмов в пристроях СЦБ виникають через вимкнення електричної енергії, 7 % – через підвищення (зниження) напруги, 7 % – з інших причин.

Класифікація споживачів тягових підстанцій

Електроенергія, яка отримується від системи електропостачання, витрачається не тільки на тягу поїздів, але використовується всіма службами залізниці, пов'язаними з експлуатацією і обслуговуванням рухомого складу, як вказувалося раніше.

На залізничному транспорті всі споживачі електричної енергії підрозділяються на: тягові споживачі; нетягові залізничні споживачі; інші нетягові споживачі (рис. 1).

Споживання енергії електричною тягою має певну специфіку щодо схем живлення, розподілу і перетворення електричної енергії в енергію руху поїзда. Частина нетягових споживачів може споживати електричну енергію за традиційними схемами змінного струму промислової частоти, інша частина споживачів живиться, наприклад, від ліній тягової мережі за схемами, які мають конструктивні особливості.

Електроспоживання нетягових залізничними споживачами проводиться на наступних напрямках: електроспоживання електроустановкам депо, промислових підприємств; електропостачання лінійних пристроїв автоблокування; освітлення станцій; інші нетягових споживачі.

За обсягом споживаної електроенергії їх можна умовно розділити на дві групи: потужні споживачі, розташовані головним чином на залізничних вузлах, сортувальних станціях; споживачі невеликої потужності, розосереджені вздовж залізничної дільниці.

Основні потужності споживають великі станції та вузли, на яких виконується великий обсяг технічних і вантажних операцій.

Сумарні електричні навантаження цих споживачів коливаються в межах 1000...2000 кВт для середніх дільничних станцій, до 7000... 8000 кВт і більш для великих сортувальних станцій та вузлів.

Найбільш потужними споживачами електроенергії (до 50% установленной по-

тужності в межах дирекції залізничних перевезень) є об'єкти локомотивного і вагонного господарства. На великих залізничних вузлах навантаження житлових селищ, включаючи культурно-побутові об'єкти, часто споживають потужність близьку до навантаження локомотивного господарства. Крім того, від тягових підстанцій можуть жититися районні та сільськогосподарські споживачі.

Характерні електроприймачі підприємств залізниць України – електродвигуни виробничих механізмів, силові загальнопромислові установки, електричні печі і електротермічні установки, перетворюючі установки, переносний електротроінструмент і освітлювальні установки.

До невеликих споживачів відносять навантаження освітлення проміжних станцій, зупиночних пунктів, лінійно-колійних будівель, пристрої автоблокування і інші. Для них характерна велика розосередженість і порівняно мале електричне навантаження. Для електроживлення цієї групи споживачів застосовується система поздовжнього електропостачання, що включає в себе джерела живлення, протяжні лінії електропередачі, прокладені вздовж залізничних колій (приклад, електроживлення пристроїв СЦБ – лінії ВЛ СЦБ, ВЛ ПЕ), і підключення до них трансформаторних підстанцій.

Пристрої СЦБ відносяться до споживачів I категорії, які повинні забезпечуватися електричною енергією від двох незалежних джерел живлення – основного і резервного. Основне живлення здійснюється від трифазних високовольтних ліній 6 або 10 кВ (лінія автоблокування ВЛ СЦБ), розташованих вздовж залізничних колій на самостійних опорах або на опорах контактної мережі, а резервне – від високовольтних ліній поздовжнього електропостачання ВЛ ПЕ 6 або 10 кВ або два проводи – рейка ДПР 25 кВ.

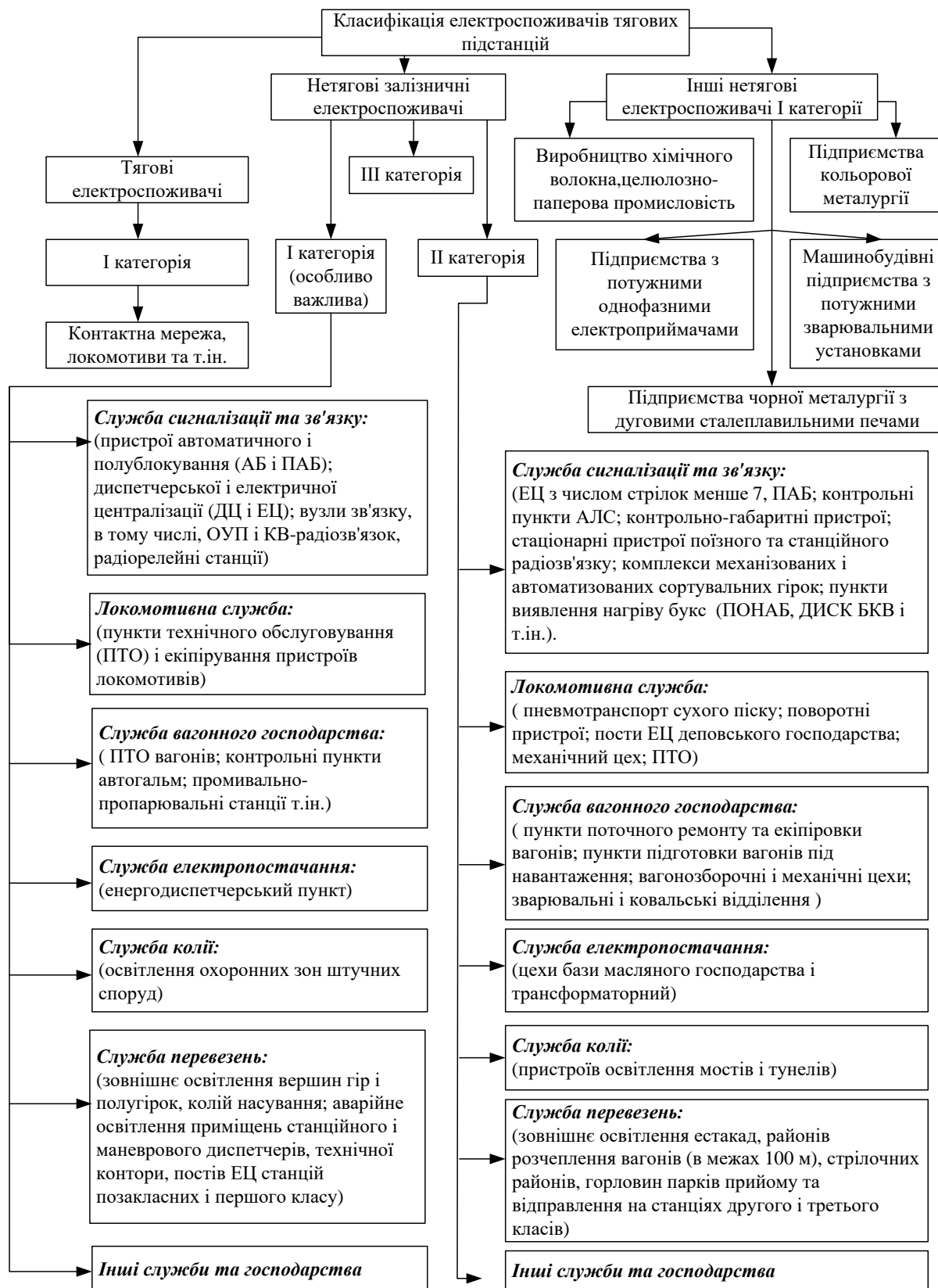


Рис.1. Класифікація споживачів тягових підстанцій

Проблеми якості електроенергії в залізничних електромережах

Якість електроенергії – відповідність рівня напруги і частоти деяким значенням, встановлених Держстандартами ДСТУ EN 50160-2011 відповідними нормативами [16–20]. В даному розділі узагальнимо та порівняємо основні терміни та вимоги до якості електричної енергії на підставі згаданих вище нормативних документів.

До основних параметрів якості електричної енергії відносять:

1) змінення напруги електропостачання (відхилення напруги або по-російськи «отклонение напряжения»):

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де U – діюче значення напруги прямої послідовності або просто діюче значення напруги, $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга. Відхилення напруги спостерігаються при її зміні напруги зі швидкістю менше ніж 1 % за секунду.

$$U = \frac{1}{3} (U_{\text{AB}(1)} + U_{\text{BC}(1)} + U_{\text{AC}(1)}), \quad (1.2)$$

де $U_{\text{AB}(1)}, U_{\text{BC}(1)}, U_{\text{AC}(1)}$ – діючі значення міжфазних напруг основної частоти.

Через зміни навантажень в часі, зміни рівня напруги та інших факторів змінюється величина падіння напруги в елементах мережі і, отже, рівень діючого значення напруги U в даний момент часу t . В результаті виявляється, що в різних точках мережі в один і той же момент часу, а в одній точці – в різні моменти, відхилення напруги різні.

Нормальна робота електроприймачів в мережах напругою до 1 кВ забезпечується за умови, що відхилення напруги на їх вході не перевищують $\pm 5\%$ (нормальне значення) і $\pm 10\%$ (максимальне значення). У мережах напругою 6...36 кВ встановлюється максимальне відхилення напруги $\pm 10\%$.

Через те, що кількість користувачів, які отримують електроенергію безпосередньо від мереж високої напруги, є обмеженою

та, зазвичай, вони мають індивідуальні контракти, то в стандарті ДСТУ EN 50160:2014 не наведено норми на змінення напруги електропостачання [19].

2) коливання напруги характеризують флікером або швидкою зміною напруги (або по-російськи «размах изменения напряжения»):

$$pU = \frac{U_{\text{min}} - U_{\text{max}}}{U_{\text{max}}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

Колівання напруги спостерігаються при її зміні зі швидкістю більше ніж 1 % за секунду.

Значення коливання напруги мають ті ж самі норми, що і відхилення напруги з єдиною відмінністю: тривалість процесу менше однієї хвилини. Нормально допустимим коливанням напруги вважається діапазон в 5%, тобто: $\pm 5\%$ (наприклад, для мереж до 1000 В від 209 В до 231 В). Гранично допустимим коливанням напруги вважається діапазон $\pm 10\%$ (від 198 В до 242 В).

До розмахів зміни напруги відносять поодинокі зміни напруги будь-якої форми з частотою повторення від двох разів на хвилину (1/30 Гц) до одного разу на годину, що мають середню швидкість зміни напруги більше 0,1 % в секунду (для ламп розжарювання) і 0,2 % в секунду для інших приймачів.

Швидкі зміни напруги викликаються ударним режимом роботи двигунів металургійних прокатних станів, тягових установок залізниць, лугових сталеплавильних печей, зварювальної апаратури, а також частими пусками потужних короткозамкнених асинхронних електродвигунів, коли їх пускова реактивна потужність становить кілька відсотків від потужності короткого замикання.

Флікер або мерехтіння (flicker) Відчуття нестійкості зорового сприйняття, спричинене світловим подразником, яскравість або спектральний розподіл якого коливається в часі [IEV 161-08-13]. Колівання напруги зумовлюють зміни світлового потоку ламп, які можуть створювати зорове явище.

Флікер, величина якого перевищує певний поріг, стає подразнювальним. Роздратування збільшується дуже швидко із зростанням амплітуди коливань. Але навіть дуже малі амплітуди за певних частот повторення можуть бути дратівливими [19].

Показник флікера

$$P_{lt} = 3 \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \leq 1, \quad (1.4)$$

де P_{sti} – показник короточасного флікера, який вимірюється протягом 10 хв. P_{st} має бути не більше 1,38 (або 1 – для приміщень з лампами розжарювання і там, де необхідні значні зорові зусилля) протягом 100 % часу вимірювання, P_{lt} – показник довгочасного флікера, який обчислюють за даними 12 вимірів, які були зроблені протягом двох годин.

Основні вимоги, що пред'являються до коливань напруги, обумовлюються намірами захистити зір людини. Встановлено, що найбільша чутливість ока до мерехтіння світла спостерігається при 8,7 Гц. Тому для ламп розжарювання, які забезпечують робоче освітлення при значних зорових напруженнях, розмах напруги допускається не більше 0,3 %, для побутових ламп накалювання – 0,4 %, для люмінесцентних ламп та інших електроприймачів – 0,6 %.

Для зниження розмаху зміни напруги в освітлювальній мережі застосовують роздільне живлення приймачів освітлювальної мережі і силового навантаження, поздовжню ємнісну компенсацію мережі живлення, синхронні електродвигуни (компенсатори) та штучні джерела реактивної потужності (реактори або конденсаторні батареї, струм яких формується за допомогою керованих вентилів для отримання необхідної реактивної потужності).

3) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (\overline{NEAN}) або коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_v = \frac{1}{U_{ном}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \% = \frac{U_{v\Sigma}}{U_1} \cdot 100 \%,$$

де $U_{v\Sigma}$ – діюче значення напруги від усіх гармонік, існуючих в цій напрузі; U_1 – напруга першої гармоніки (50 Гц); N – порядок останньої з врахованих гармонічних складових, U_n – діюче значення n-й ($n = 2 \dots N$) гармонічної складової напруги.

Під час роботи потужних випрямних і перетворювальних установок встановлених на тягових підстанціях чи підприємствах, а також дугових печей і установок для зварювання, тобто нелінійних елементів, відбувається скривлення кривих струму і напруги. Несинусоїдальні криві струму і напруги містять гармонійні коливання, які мають різні частоти. Промислова частота $f = 50$ Гц є основною і зветься першою. Це нижча гармоніка, всі інші по відношенню до неї – вищі гармоніки і мають частоти $f_n = 50 \cdot n$, Гц.

Вищі гармоніки в системі електропостачання викликають додаткові втрати енергії, скорочують термін служби конденсаторних батарей, електродвигунів і трансформаторів, призводять до труднощів при налагодженні релейного захисту та сигналізації, а також експлуатації електроприводів з тиристорним керуванням і т. п.

Для зниження вищих гармонік застосовуються силові індуктивно-ємнісні фільтри, які налаштовані в резонанс на певну гармоніку. З метою виключення гармонік нижчих частот застосовують перетворювальні установки з великим числом фаз.

Нормальні і максимальні значення $K_v = K_{нсU}$ не повинні відповідно перевищувати: в електричній мережі напругою до 1 кВ – 5 і 10 %, в електричній мережі 6...20 кВ – 4 і 8 %, в електричній мережі 35 кВ – 3 і 6 %, в електричній мережі 110 кВ і вище 2 і 4 %.

Раніше вважалось, що напруга є якісною, якщо $K_v \leq 5 \%$. Зараз СКГС напруги електропостачання (ураховуючи всі гармоніки

до 40-ої включно) мають бути меншими чи рівними 8 %. Обмеження порядку гармонік до 40 є загальноприйнятим [19].

5) Напряга гармоніки (harmonic voltage) – синусоїдальна напруга з частотою, яка пропорційна з цілим множителем основній частоті (50 Гц) напруги електропостачання.

Напруги гармонік можуть бути оцінені через відносну амплітуду напруги окремої гармоніки U_h , віднесеною до напруги основного складника U_1 , де h — це порядок гармоніки, або через сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (\overline{NEAN}), який обчислюють за формулою:

$$\overline{NEAN} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}. \quad (1.7)$$

б) Коефіцієнту n -ї гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку $K_{U(n)}$ або як вказано в ДСТУ EN 50160:2014 відносна амплітуда напруги окремої гармоніки U_h . Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ представляє собою відношення діючого значення n -ї гармонічної складової напруги до діючого значенням напруги основної частоти 50 Гц і має дорівнювати

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100\% \leq 8\% \text{ протягом } 95\% \text{ часу за тиждень.}$$

За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в таблицях [19]. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік.

Результати порівняння норм на коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ за держстандартами ГОСТ 13109-97 і ДСТУ EN 50160:2014 були такими, як наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Норми на коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ для різного рівня напруг за стандартами

$K_{U(n)}$ за ГОСТ 13109-97				СКГС (\overline{NEAN}) за ДСТУ EN 50160: 2014
протягом 95 % часу вимірю- вання		протягом 100 % часу вимірю- вання		8% про- тягом 95 % ча- су за ти- ждень
0,38 кВ	8 %	0,38 кВ	12 %	
6...20 кВ	5 %	6...20 кВ	8 %	
35 кВ	4 %	35 кВ	6 %	
110...	2%	110...	3 %	
330 кВ		330 кВ		

Проаналізував стандарт ДСТУ EN 50160:2014 було з'ясовані норми на відносні величини амплітуд низької, середньої та високої напруг для різних гармонік до 25-го порядку (табл. 4).

7) Напряга інтергармоніки (interharmonic voltage) – синусоїдальна напруга з частотою, коефіцієнт пропорційності якої до основного складника напруги електропостачання не є цілим числом.

Рівень інтергармонік в енергосистемах низької і середній напрузі (1...35 кВ) збільшується внаслідок науково-технічного прогресу і впровадження нових перетворювачів частоти й систем регульовального обладнання. Інтергармоніки низького рівня ведуть до зростання флікера і суттєво впливають на системи, в яких використовують змодульовані тональні посилки.

Через низькі частоти (200...500 Гц), які обумовлені наявністю індуктивності і ємності в схемах заміщення при яких виникає резонанс в мережах високої напруги допуски для напруг інтергармонік не встановлено, а їх вплив незначний. Це питання потребує більш детального наукового дослідження.

Таблиця 4

Величини гармонік в точках приєднання у відношенні до первинної напруги U_1 50 Гц для низької, середньої та високої напруг

Непарні напруги				Парні напруги	
не кратні 3		кратні 3			
Порядок гармоніки h	Відносна амплітуда $U_h, \%$	Порядок гармоніки h	Відносна амплітуда $U_h, \%$	Порядок гармоніки h	Відносна амплітуда U_h
5	6,0/5,0	3	5,0/3,0	2	2,0 / 1,9
7	5,0/4,0	9	1,5/1,3	4	1,0
11	3,5/3	15	0,5/0,5	6...2 4	0,5 / 0,5
13	3,0/2,5	21	0,5 / 0,5		
17	2,0 / на розгляді				
19	1,5 / на розгляді				
23	1,5 / на розгляді				
25	1,5 / на розгляді				

Примітка: Величини значень відносної амплітуди гармонік U_h наведено у чисельнику для низької та середньої напруг, а в знаменнику – для високої напруги

8) Відхилення частоти:

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}} \text{ або } qf = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

Раніше нормувалось відхилення частоти нормувалось більш жорстко. Перш за все зміна частоти живлячої напруги впливає на режими роботи електрообладнання, швидкість обертання роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів, технологічний процес різних виробництв (наприклад, прокатних станів) і, як наслідок, на техніко-

економічні показники роботи промислових підприємств.

Електромагнітна складова збитку обумовлена збільшенням втрат активної потужності в електричних мережах і зростанням споживання активної та реактивної потужностей. Відомо, що зниження частоти на 1 % збільшує втрати в електричних мережах на 2 %.

Технологічна складова збитків спричинені в основному недовипуску промисловими підприємствами своєї продукції і вартістю додаткового часу роботи підприємства для виконання завдання. Згідно з експертними оцінками значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного.

Ступінь впливу частоти на продуктивність ряду механізмів може бути виражена через споживану ними активну потужність.

Відхилення частоти негативно впливає на роботу електронної техніки: відхилення частоти більш +0,1 Гц призводить до яскравості і геометричним фоновим спотворень телевізійного зображення, зміни частоти від 49,9 до 49,5 Гц викликає майже чотириразове збільшення допустимого розмаху телевізійного сигналу до фонові завади.

Також жорсткі вимоги до частоти мережі висувають електродвигуни, трансформатори, реактори зі сталевим магнітопроводом, де зниження частоти викликає додатковий нагрів сталевих сердечників.

Для запобігання загальносистемних аварій, викликаних зниженням частоти передбачаються спеціальні пристрої автоматичного частотного розвантаження (АЧР), що відключають частину менш відповідальних споживачів. Після ліквідації дефіциту потужності, наприклад після включення резервних джерел живлення, спеціальні пристрої частотного автоматичного повторного включення (ЧАПВ) включають раніше відключені споживачі і нормальна робота енергосистеми відновлюється.

Отже, підтримка нормальної частоти, що відповідає вимогам стандарту є не тіль-

ки технічною, а і науковою задачею, основний шлях вирішення якої – введення генеруючих потужностей з метою створення резервів потужності в мережах енергопостачальних організацій і розробка математичних моделей і алгоритмів з підтримки частоти на заданому ДСТУ рівні.

За Держстандартом ГОСТ 13109-97 1997 року відхилення частоти Δf протягом 95 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,2$ Гц (нормально допустиме значення) та протягом 100 % часу вимірювання $\Delta f = \pm 0,4$ Гц (гранично допустиме значення).

За ДСТУ EN 50160:2014:

- для систем, які синхронно підключено до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 1\%$ протягом 99,5 % часу за рік; 50 Гц $+4\% \dots -6\%$ протягом 100 % часу вимірювання;

- для систем, які без синхронного підключення до системи зовнішнього електропостачання: 50 Гц $\pm 2\%$ протягом 95 % часу за тиждень; 50 Гц $\pm 15\%$ протягом 100 % часу вимірювання.

За рівнями напруги (низька напруга – до 1 кВ, середня напруга – від 1 до 35 кВ, висока напруга – від 36 до 150 кВ) існують такі стандарти щодо відхилення частоти [19]: номінальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку вимірюють протягом 10 с і яка має бути для систем, що синхронно підключені до об'єднаної енергосистеми; 50 Гц $\pm 1\%$ (тобто 49,5...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік; 50 Гц $+4 \dots -6\%$ (тобто 47...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання; для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто систем типу «енергетичний острів»): 50 Гц $\pm 2\%$ (тобто 49...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень; 50 Гц $\pm 15\%$ (тобто 42,5...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання.

9) Провали напруги і перенапруги.

Причиною провалів напруги є аварійні ситуації. Перенапруги виникають через пе-

ремикання або відключення навантаження, природні явища, які є випадковими і які важко передбачити.

В мережах низької і середньої напруги традиційно поріг початку провалу напруги дорівнює 90 % від номінальної напруги, поріг початку перенапруги – 110 % від номінальної напруги. Величина гістерезисну звичайно дорівнює 2 %, рекомендовані правила встановлення величини гістерезису наведено в EN 61000-4-30:2009, 5.4.2.1 [19]. При цьому слід розглядати лінійну напругу у чотирипровідних (між проводом і нейтраллю) і трипровідних (між лінійними проводами) системах, в однофазних мережах також лінійну напругу в залежності від типу підключення між проводом і нейтраллю або між лінійними проводами.

Оцінювання провалів напруги треба провадити відповідно до EN 61000-4-30 залежить від цілі оцінювання. Частіше за все використовується поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає подію з однаковою тривалістю і остаточною напругою. Також можна використовувати правила, які описані в IEC/TR 61000-2-8, 4.3.2.4 Класифікація провалів напруги.

В системах високої напруги оцінювання перенапруг треба провадити відповідно до EN 61000-4-30. В основі методу аналізу перенапруг для трифазних систем лежить поліфазне узагальнення результатів, яке передбачає визначення еквівалентної події й характеризується однаковою залишковою напругою. Також узагальнюють події в часі і використовують правила рекомендовані в IEC/TR 61000-2-8.

10) Небаланс напруг або напруга зворотної послідовності.

Раніше за ГОСТ 13109-97 нормувалося коефіцієнт несиметрії напруг за зворотної послідовності K_{2U} , який повинен протягом 95 % часу вимірювання 2% та протягом 100 % часу вимірювання 4% від напруги прямої послідовності (основного складника). За ДСТУ EN 50160-2014 висуваються більш жорсткі вимоги і допуска-

ється лише 3 % від напруги прямої послідовності (основного складника) [17, 19].

Взагалі для систем з низькою, середньою та високою наругою за нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах 0...2 % від складника напруги прямої послідовності. В стандарті [19] наведено значення тільки для складника зворотної послідовності, тому що ця складова стосується можливих взаємних впливів підключеного до системи устаткування.

З усіх перелічених параметрів якості електричної енергії на тягових підстанціях контролюється відхилення і колювання напруги на шинах підстанції, флікер, перериви в електропостачанні їх тривалість, перенапруга. Критичні значення струму і напруги в системі тягового енергопостачання контролюються в режимі реального часу за допомогою засобів релейного захисту, наприклад «Регіна». Інші параметри в процесі експлуатації не визначаються зовсім. Вимірювання напруги гармонік і інтергамонік, визначення коефіцієнта несинусоїдальності і т. ін. можливе лише при виявленні порушень нормального функціонування тягових і нетягових споживачів або при впровадженні нових систем і обладнання.

Аналіз роботи типової тягової підстанції змінного струму

Аналіз роботи типової тягової підстанції змінного струму за 2018 року шляхом обліку спожитої електроенергії і визначення коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ без урахування перетікання реактивної потужності дано в табл. 5.

Було розраховано баланс електроенергії по вводам 10кВ тягової підстанції змінного струму, який показує різницю між споживаною від енергосистеми електроенергії і відданою нетяговим споживачам. Різниця показань пояснюється різними типа лічи-

льників встановлених на тяговій підстанції і в системі зовнішнього електропостачання. Результати дано в табл. 6.

Таблиця 5

Коефіцієнт потужності на шинах типової тягової підстанції змінного струму

Дата	Шини 110 кВ		Шини 27,5 кВ	
	S, МВА	cosφ	S, МВА	cosφ
01.2018	3938.98	0,86	4643.50	0,826
02.2018	3687.55	0,87	4374.18	0,846
03.2018	3441.13	0,869	4131.38	0,852
04.2018	3158.88	0,881	3819.47	0,867
05.2018	2427.46	0,893	3003.43	0,874
06.2018	3092.50	0,888	3668.75	0,859
07.2018	3394.72	0,876	3875.87	0,846
08.2018	2673.35	0,867	3072.71	0,833
09.2018	2785.76	0,867	3173.19	0,831
10.2018	3086.12	0,862	3537.85	0,825
11.2018	3014.55	0,867	3486.32	0,833
12.2018	2934.92	0,859	3361.51	0,824

Таблиця 6

Небаланс електроенергії по вводам 10 кВ тягової підстанції змінного струму

Дата	Фактичний небаланс, кВт	Фактичний небаланс, %	Допустимий небаланс, %
01.2018	-1946	-0,96%	1,43%
02.2018	-784	0,26%	1,41%
03.2018	-1856	-0,61%	1,35%
04.2018	-1190	-0,61%	1,16%
05.2018	-3806	-1,84%	1,35%
06.2018	-3336	-1,73%	1,34%
07.2018	-1986	-1,04%	1,32%
08.2018	-2956	-1,28%	1,37%
09.2018	-3514	-1,91%	1,39%
10.2018	-1738	-0,71%	1,02%
11.2018	-1974	-0,70%	1,40%
12.2018	-700	-0,22%	1,36%
01.2019	-2302	-0,73%	1,39%

Добовий облік коефіцієнту несиметрії на шинах тягової підстанції змінного струму дано в табл. 7.

Таблиця 7

Добовий облік коефіцієнту несиметрії на шинах тягової підстанції змінного струму

Час, год.	Коефіцієнт несиметрії на шинах 110 кВ, %			Коефіцієнт несиметрії на шинах 27,5 кВ, %			Коефіцієнт несиметрії на шинах 10 кВ, %		
	UAB	UBC	UCA	UAB	UBC	UCA	UAB	UBC	UCA
0	6,36	7,27	6,36	-0,36	0,00	-0,73	10	12	9
1	6,36	6,36	5,45	0,00	-0,73	-0,36	10	11	10
2	7,27	6,36	6,36	-0,36	0,00	-1,09	10	12	9
3	5,45	7,27	6,36	-0,73	-0,36	-0,73	11	12	10
4	6,36	6,36	5,45	-0,36	0,00	-1,09	11	13	9
5	6,36	5,45	7,27	0,00	-0,36	-0,36	10	12	11
6	5,45	6,36	7,27	-0,36	0,00	0,00	10	11	9
7	5,45	6,36	6,36	0,00	-0,36	0,00	10	13	8
8	4,55	4,55	4,55	-1,82	-1,82	-1,82	10	10	5
9	4,55	4,55	4,55	-5,45	-3,64	-6,18	10	10	10
10	4,55	4,55	4,55	-5,45	-2,91	-3,64	10	10	10
11	4,55	4,55	4,55	-5,09	-3,64	-5,45	10	10	10
12	4,55	4,55	4,55	-5,09	-3,64	-3,64	15	10	10
13	4,55	4,55	4,55	-3,64	0,00	-3,27	15	15	10
14	4,55	4,55	4,55	-3,64	-2,55	-1,82	15	15	15
15	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-1,09	10	10	10
16	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-3,64	10	10	10
17	4,55	4,55	4,55	-1,82	-6,55	-2,91	10	10	10
18	4,55	4,55	4,55	0,00	-1,82	-2,91	10	10	10
19	4,55	4,55	4,55	-3,64	-3,64	-2,91	10	10	10
20	4,55	4,55	4,55	-1,82	-5,45	-5,45	10	10	10
21	4,55	4,55	4,55	-1,82	-3,64	-3,64	10	10	10
22	4,55	4,55	4,55	-1,82	-1,82	-3,64	15	10	15
23	5,45	4,55	4,55	0,00	-1,82	-1,82	10	15	10
24	5,45	5,45	5,45	-1,82	-1,82	-1,82	10	10	15

Було встановлено, що нетягове навантаження складає лише 5 % від всієї спожитої електроенергії. Таким чином вплив нетягового навантаження на систему тягового електропостачання незначний. Головною причиною несинусоїдальності напруги на шинах 10 кВ тягової підстанції є система тягового електропостачання.

Щодо питання електромагнітної сумісності (ЕМС) тягових і нетягових споживачів підстанції. Було зафіксовано, що в тяговому струмі присутні низькочастотні гармоніки.

Серед усіх них амплітуда третьої гармонійної складової є найвищою (крім основної 50 Гц). Третя гармоніка амплітудою 500...800 В біла зафіксована і на шинах 110 кВ тягової підстанції. При цьому коефіцієнт n-ної гармоніки

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{nom}} \cdot 100\% = 0,45...0,72\%, \text{ що не}$$

перевищує норму.

Інші питання ЕМС більш детально описані в [22 - 25].

Висновки

Оцінено параметри якості електричної енергії, яка надходить на шини типової тягової підстанції змінного струму і передається споживачам. Коефіцієнт несиметрії на шинах 110 кВ не перевищував 7,27 %, на шинах 10 кВ досягав 15 %, а на шинах 27,5 кВ – 6,18 % за добу, але в цілому є нижчим ніж на шинах 110 і 10 кВ.

Оцінена електромагнітна сумісність споживачів ТП. Електромагнітна ситуація в даному випадку є задовільною.

Виконано класифікацію споживачів тягових підстанції за категорією електроспоживання і видом навантаження. Нетягові споживачі споживають лише 5 % від всієї електроенергії.

На тягових підстанціях контролюється обмежена кількість параметрів якості електричної енергії: відхилення і колювання напруги на шинах підстанції, флікер, перериви в електропостачанні їх тривалість, перенапряга. Критичні значення струму і напруги в системі тягового енергопостачання контролюються в режимі реального часу за допомогою засобів релейного захисту, наприклад «Регіна». Інші параметри в процесі експлуатації не визначаються зовсім. Вимірювання напруги гармонік і інтегралів, визначення коефіцієнта несинусоїдальності і т. ін. можливе лише при виявленні порушень нормального функціонування тягових і нетягових споживачів або при впровадженні нових систем і обладнання.

Библиографический список

1. Енергетична стратегія України до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. Київ, 2013. – 166 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
2. Енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. Київ, 2017. –73 с. Режим доступу:

- <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>
3. Сердюк Т.В. Основні положення нової енергетичної стратегії України до 2035 року. Т. В. Сердюк, А. О. Гурська [Електронний документ] / Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України». Тези. – 2017. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2017/schedConf/presentations>
4. Drive Ukraine 2030. Міністерство інфраструктури України. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/files/projects/str.html>
5. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
6. Бондаренко В. О. Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками / В.О. Бондаренко, И.В. Доманский, Г.Н. Костин // Электротехника і Електромеханіка, 2017, №1, 54 – 62 с.
7. Доманський І.В. Електрифікація залізниць – джерело підвищення енергетичної ефективності процесу перевезень // Залізничний транспорт України. – 2014. – №1. – С. 19-23, 31-33.
8. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009: Затв. Наказ Укрзалізниця 24.12.2004 р., № 1010-ЦЗ. / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2005. – 80 с.
9. Доманський І.В. Системний аналіз зовнішнього електропостачання тягових підстанцій залізниць // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №3. – С. 54-63. doi: 10.20998/2074-272X.2013.3.10.
10. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения // К.: Наукова думка, 1987. – 174 с.
11. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии // М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
12. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог // М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
13. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенса-

- ції в системі тягового електропостачання // Вестник РГУПС. – 2013. – №2. – С. 12-17.
14. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т.75. – №1. – С. 26-34.
 15. Крюков А.В. Электрические нагрузки нетяговых потребителей. /Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 149 с.
 16. Гаврилюк, В. І. Електроживлення систем залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку [Текст]: монографія / В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко, Т. М. Сердюк; за заг. ред. В. І. Гаврилюка; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – 193 с.
 17. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. [Введ.01.01.2000]. – К.: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. – 31 с.
 18. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: СОУ-Н ЕЕ40.1-37471933-55:2011 [Чинна з 31.10.2011]. - К.: Міненерговугілля, 2012. – 98 с.
 19. Характеристики нагрузки электропостачания в электрических сетях общего назначения: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
 20. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИЕС 61000-4-30 – 2017 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии (ИЕС 61000-4-30:2015, IDT). Москва: Стандартинформ, – 2018. – 61 с.
 21. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Вид-во «Форт», 2017. – 760 с.
 22. T. Serdiuk, V. Havryliuk, M. Feliziani, K. Serdiuk, Propagation of Harmonics of Return Traction Current in Rail lines Proc. of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2019, Barcelona, Spain, September 2-6, 2019, pp. 550-555.
 23. Serdiuk T. M. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices Proc. of the 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2017, Angers, France, September 4-8, 2017. – Ind. 123.– 6 p.
 24. T. Serdiuk, M. Feliziani, K. Serdiuk. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway. Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018, pp. 242-247.
 25. Serdyuk T. N. Measurement of electromagnetic interference in the station rail circuits // Proc. of the 10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011), York, UK, September 26-30, 2011. - IEEE Cat. No. CFP1106F-CDR. Print ISBN: 978-0-9541146-3-3. – York (United Kingdom). – 2011. - p.214-217.

Ключові слова: параметри якості електричної енергії, тягові і нетягові споживачі, тягова підстанція, електромагнітна сумісність.

Ключевые слова: параметры качества электрической энергии, тяговые и нетяговые потребители, тяговая подстанция, электромагнитная совместимость.

Keywords: power quality parameters, traction and non-traction consumers, traction substation, electromagnetic compatibility.

Рецензенти:
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Поступила в редколегію 05.02.2019.
Прийнята до друку 19.02.2019.