

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Викладено результати досліджень, що вказують на можливість використання деяких додаткових показників якості електроенергії в системі електричної тяги постійного струму на вході та виході тягової підстанції. Показано, що ці показники істотно спрощують аналіз якості електроенергії, яка поступає в тягову мережу.

Изложены результаты исследований, указывающие на возможность использования показателей качества электроэнергии в системе электрической тяги постоянного тока на входе и выходе тяговой подстанции. Показано, что эти показатели существенно упрощают анализ качества электроэнергии, поступающей в тяговую сеть.

The research results showing an opportunity to use a power quality rating in a system of direct current electric traction on a traction substation input and output are stated. It is demonstrated that these ratings essentially simplify the quality analysis of power coming into traction circuits.

Вступ

ГОСТ 13109-97 [1] дозволяє чітко розподіляти електроенергію на ту, що відповідає нормам якості, та ту, яка цим нормам не відповідає. Критеріями оцінки цієї самої якості прийняті одинадцять показників якості електроенергії (ПЯЕ). Саме вони і регламентують так звані «нормально допустимі» та «гранично допустимі» норми якості електроенергії (ЯЕ). Тобто ГОСТ 13109-97 встановлює «допустимі» відхилення різних фізичних величин (напруги, її гармонійного складу, частоти та ін.) від певних номінальних значень. Вихід ПЯЕ за ці рамки означає, що електроенергія не може рахуватися як якісна. Також треба зазначити, що цей документ стосується лише електричних мереж систем електропостачання загального призначення змінного однофазного та трифазного струму частотою 50 Гц. Однак відомо, що більше ніж 50% залізничного транспорту України, весь шахтний, міський та кар'єрний електротранспорти живляться випрямленою («постійною») напругою. І, таким чином, постає питання: яким критеріям повинна відповідати електроенергія всередині системи постійного струму, тобто на стороні випрямленої напруги?

Як відомо, висока якість електроенергії необхідна для споживача з багатьох причин. Тому показники якості електроенергії (ПЯЕ) оцінюють відносно точок, в яких споживач приєднаний до системи електропостачання. В системах електричної тяги як постійного, так і змінного струмів джерелом і споживачем електроенергії можна вважати різні підсистеми (рис. 1) і тому, за нашою думкою, значення ПЯЕ потрібно (і можливо) оцінювати відносно таких точок:

1-1', якщо джерелом вважати лише живлячу ЛЕП, а навантаженням – усю систему тяги. При

цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ усієї системи тяги;

2-2', якщо джерелом вважати ЛЕП і тягову підстанцію (ТП), а споживачем – тягову мережу (ТМ) і електрорухомий склад (ЕРС). При цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ на виході усієї ТП чи фідерів;

3-3', якщо навантаженням вважати лише ЕРС. При цьому знайдені ПЯЕ будуть ПЯЕ на струмоприймачі ЕРС.

У випадку точок 1-1' необхідні ПЯЕ визначаються відносно системи змінного струму 50 Гц і вони регламентуються ГОСТ 13109-97. Деякою особливістю є оцінка ПЯЕ в точках 2-2' і 3-3', тобто на стороні випрямлених (але які змінюються в часі) напруги і струму. В [2] зазначено, що і для електромереж постійного струму існують ПЯЕ і вони являють собою: відхилення, колювання і коефіцієнт пульсації напруги.

До зазначеного вище додамо, що в іноземній, і все частіше вітчизняній, літературі під якістю електроенергії часто розуміють не лише збереження параметрів напруги живлячої мережі, але й параметрів струму, який споживається із мережі. Ці ПЯЕ обумовлені реакцією зворотної дії навантаження на джерело електроенергії.

Нижче виконано оцінку ряду (не всіх) ПЯЕ відносно зазначених точок у системі електротяги постійного струму.

Поняття і результати чисельних розрахунків ПЯЕ

Основним документом, що регламентує роботу залізниць України, є «Правила технічної експлуатації залізниць України». В частковому випадку роботу споруд та пристроїв електропо-

стачання залізниць встановлює його розділ 7. Проте, на відміну від систем змінного струму загального призначення, де встановлюються ПЯЕ, по чисельних значеннях яких можливо зробити висновок про відповідність електро-

енергії нормам якості, до системи постійного струму застосовують лише два терміна, що встановлюють тільки рівні напруг: найбільше та найменше.

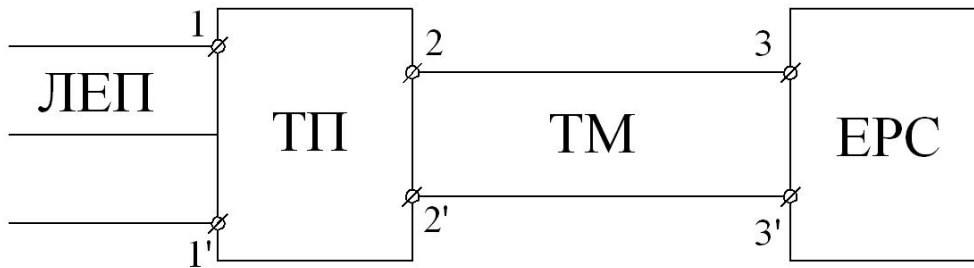


Рис. 1

Під найбільшою напругою розуміють найбільше допустиме значення напруги на шинах тягової підстанції (ТП) та струмоприймача електрорухомого складу (ЕРС) за будь-яких експлуатаційних умов, за виключенням комутаційних режимів. Найбільша напруга на шинах ТП та ЕРС не повинна перевищувати 3850 В на ділянках, де не застосовують рекуперативне гальмування, та 4000 В, де такий вид гальмування застосовують.

Номінальна напруга на шинах ТП складає 3300 В, а на струмоприймачі ЕРС 3000 В.

Під найменшою напругою розуміють найменше допустиме значення напруги на струмоприймачах ЕРС за будь-яких експлуатаційних умов, за виключенням комутаційних режимів. Найменша напруга на струмоприймачах ЕРС має бути не меншою за 2700 В. Найменша напруга на шинах ТП не нормується.

Вимірювання ж напруги на залізничному

транспорті України виконують саме на шині «+» ТП двічі на рік протягом 24 годин (в режимну добу). При цьому день вибирають довільно, а дані фіксують дискретно за показаннями вольтметра з частотою одне значення на годину. На рис. 2 (крива 1) показана крива напруги, що знята в режимну добу на одній з ТП Придніпровської залізниці. Звичайно, такий підхід не дає відповіді на питання: а яке ж дійсне значення напруги на струмоприймачі ЕРС при русі його в міжпідстанційній зоні (МПЗ)? Він навіть не дає інформації про дійсне значення напруги на шинах ТП, бо в проміжках між фіксуваннями значень напруги вона може істотно змінюватися, і таким чином впливає, що отримана крива є якоюсь усередненою і до того ж випадковою. На рис. 2 (крива 2) показана дійсна крива напруги (знята в той же час за допомогою самозаписуючого пристрою).

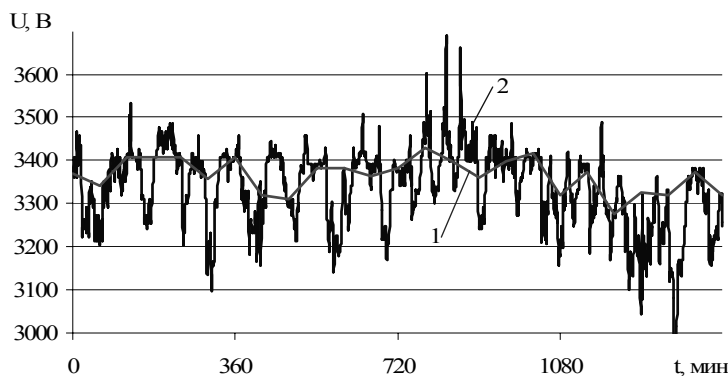


Рис. 2

Таким чином, постає питання про уведення певних ПЯЕ, за допомогою яких можливо робити висновок щодо ЯЕ на виході ТП. Спробуємо визначити деякі з них. Для цього були записані та оброблені 10 реалізацій добових напруг на шині «+3,3 кВ» та осцилограми вхідних

струмів ТП «Горяїново» та ТП «Нижньодніпровськ-Вузол» Придніпровської залізниці.

Відхилення напруги визначають, як відносна різниця між фактичним U та номінальним $U_{ном}$ значеннями напруги на шині «+ 3,3 кВ» ТП:

$$\delta U_0 = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U – усереднене значення напруги на шині «+3,3 кВ» за хвилину;

$U_{\text{ном}} = 3,3$ кВ – номінальна напруга на шині «+3,3 кВ».

В [3] під відхиленням напруги для ТМ пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка призводить до зміни швидкості руху ЕРС. При цьому слід рахувати відхилення позитивним, якщо $U > U_{\text{ном}}$, та від'ємним, якщо $U < U_{\text{ном}}$.

Дані мінімальних та максимальних значень відхилення напруги на шинах ТП, тобто в точках 2-2', наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Доба	Відхилення напруги, %	
	max	min
1	15,93	-8,43
2	14,19	-6,91
3	10,67	-7,62
4	11,80	-9,82
5	6,57	-8,80
6	9,15	-9,39
7	10,62	-8,82
8	9,50	-7,03
9	17,41	-8,65
10	7,97	-6,6

В системі змінного струму ЯЕ по усталеному відхиленню напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважають такою, що відповідає нормам ГОСТ, якщо всі виміряні за кожну хвилину, на протязі встановленого періоду часу (24 години), значення усталеного відхилення напруги знаходяться в інтервалі, що обмежений гранично допустимими значеннями, а не менше 95 % виміряних за той же період часу значень усталеного відхилення напруги знаходяться в інтервалі, що обмежений нормально допустимими значеннями.

Нормально допустимі значення усталеного відхилення напруги для системи постійного струму не встановлені.

Оцінку ПЯЕ в точках 3-3' проводили деякі дослідники і раніше [4]. Для порівняння можна навести отримані значення відхилення напруги на струмоприймачі першого українського електровоза ДЕ-1. Відхилення за максимальним значенням склало 36,7 %, а за мінімальним – 24,45 %.

Під коливаннями напруги розуміють швидкі зміни напруги, що протікають зі швидкістю 1...2 % за секунду. В [3] під коливанням напруги для ТМ пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка не призводить до зміни швидкості руху ЕРС.

Коливання напруги характеризують амплітудою (розмахом) коливань:

$$\delta U_0 = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Провал напруги характеризують довжиною $\Delta t_{\text{П}}$ та глибиною провала $\delta U_{\text{П}}$. Глибину провала визначають за формулою:

$$\delta U_{\text{П}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Також не можна залишати без уваги і струм, який протікає між енергопостачальною організацією та ТП постійного струму. Якщо порівняти форми підведеної до ТП напруги та споживаний нею струм (рис. 3 і 4), можна зробити однозначний висновок про те, що крива струму значно більше спотворена, ніж крива напруги.

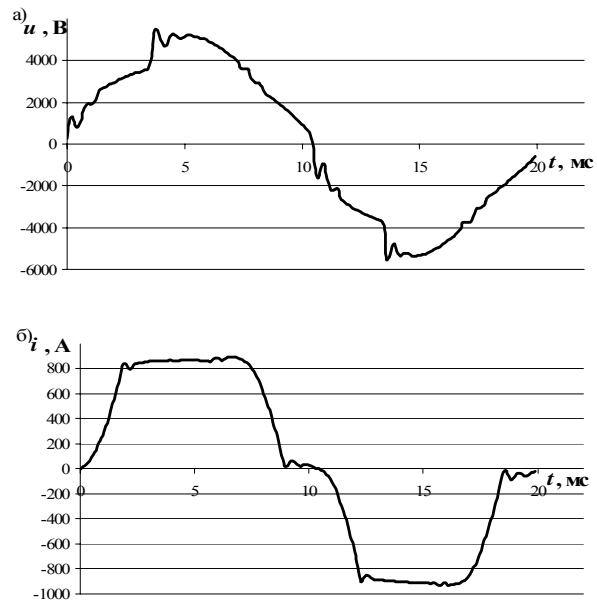


Рис. 3

- а) Осцилограма вхідної напруги до ТП з 6-пульсовим випрямлячем;
б) Осцилограма вхідного струму до ТП

В той же час ГОСТ 13109-97 регламентує ПЯЕ по напрузі, залишаючи осторонь струм. Але при аналізі фізичних процесів виходить, що саме струм, який спотворений комутацією силових випрямлячів на ТП та комутацією на колекторах тягових електричних двигунів (ТЕД) в ЕРС, викликає зворотне спотворення синусоїдної напруги. З огляду на це, можна сказати, що існуючий підхід нормування ПЯЕ є

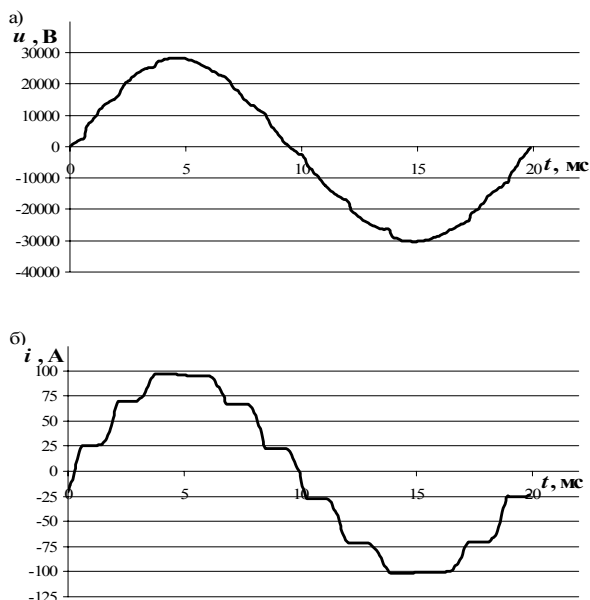


Рис. 4

а) Осцилограма вхідної напруги до ТП з 12-ти пульсовим випрямлячем;

б) Осцилограма вхідного струму до ТП

недостатньо ефективним, адже він направлений на подолання наслідків погіршення ЯЕ, а не на

подолання причини. Як було зазначено вище, за кордоном такий взаємозв'язок враховують. Сумарні спотворення струму в живлячій мережі оцінюють, згідно стандарту IEEE 519-1981, інтегральним коефіцієнтом гармонійного складу струму, $I_{\text{TND}} (\%)$ [5]:

$$I_{\text{TND}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{49} I^{(k)^2}}}{I^{(1)}}, \quad (4)$$

де $I^{(k)}$, $I^{(1)}$ – діючі значення, відповідно, вищих та першої гармонік струму мережі;

TND – Total Harmonic Distortion (Загальне Гармонійне Спотворення).

Допустиме значення коефіцієнта залежить від співвідношення струмів короткого замикання (к.з.) та номінального (табл. 2).

Показник гармонійного складу вхідного до ТП струму був отриманий для приєднання, від якого живляться лише тягові споживачі, тобто в точках 1-1'. Його значення отримане на рівні 9,91 % для 12-пульсної та 17,1 % для 6-пульсної схеми випрямлення.

Таблиця 2

$I_{\text{КЗ}}/I_{\text{Н}}$	< 20	20...50	50...100	100...1000	> 1000
$I_{\text{TND}} (\%)$	5,0	8,0	12,0	15,0	20,0

Висновки

Таким чином, введення додаткових ПЯЕ, які обмежують ненормальні відхилення електричних величин, дозволить:

1. Вдосконалити систему оцінювання ЯЕ.
2. Ще більш різнобічно розглядати проблему покращення її.
3. Стимулювати як постачальника, так і споживача електроенергії шукати шляхи її вирішення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст].
2. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / Р. Р. Ма-

мошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
4. Мищенко, Т. Н. Показатели качества электроэнергии в тяговой сети на токоприемниках электровозов постоянного тока [Текст] / Т. Н. Мищенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 23. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 114-116.
5. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский // Электротехника. – 1998. – Вып. 3. – С. 10-17.

Надійшла до редколегії 01.04.2010.

Прийнята до друку 14.04.2010.