

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Викладено результати досліджень, в яких аналізуються чисельні значення деяких основних показників якості електроенергії в лініях зовнішнього електропостачання системи електричної тяги постійного струму. В якості доповнення приведені величини додаткових і основних втрат електроенергії в них.

Ключові слова: показники, електроенергія, якість, коефіцієнт

Вступ

Система електричної тяги (СЕТ) (тягова підстанція (ТП) – тягова мережа (ТМ) – електропостачальний склад (ЕРС)) є потужним нелінійним (параметричним) динамічним навантаженням для ліній зовнішнього електропостачання, яке разом з районною підстанцією (РП) спотворює якість електроенергії (ЯЕ) та тим самим обумовлює додаткові непродуктивні втрати електроенергії у вищезазначених мережах. Ступінь спотворення ЯЕ можна встановити, як відомо, на основі результатів спектрального аналізу осцилограм напруг і струмів, які можуть бути отримані на реально діючих електрифікованих ділянках. На перший погляд ця задача «стара», як і сама система електротяги постійного струму, а тому повинні бути публікації і реальні осцилограми, їх гармонійний аналіз, а також безпосередньо показники ЯЕ (ПЯЕ). Однак, по-перше, авторам невідомі такі публікації. Як правило, у всіх публікаціях стверджується (без експериментальних досліджень та без посилань) про наявність лише окремих гармонік у вхідній до ТП напрузі; про оцінку показників якості та аналізі струми мови немає. Виключенням є робота [1], в якій проаналізовано вплив гармонійного складу мережевих напруг і струмів на повітряні лінії зв'язку, але знов таки, без оцінки ЯЕ. По-друге, якщо і існують будь-які результати за вказаною проблемою, то вони відносяться до системи тяги російських залізниць, навантаження яких відрізняються від українських і ці дані є морально застарілими. Виходячи із зазначеного тема цієї роботи є актуальною.

Методики експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження виконували [2] на реально діючих електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці на ТП з різними рівнями вхідної напруги від 6 кВ до 154 кВ, з 6-ти та 12-пульсними випрямлячами на ТП: Горяїново, Письменна, Железняково, Миколаївка,

Слав'янка, Сухачівка, Верхньодніпровськ, Нижньодніпровськ-Вузол; ПСК «Брагіновка» та ПСК-12. Вибір цих ТП був обумовлений високими значеннями тягового струму у зв'язку з наявністю підйому в профілі шляху ряду фідерних зон та високою вантажонапруженістю й тим самим значними коливаннями тягового струму на ділянках. На цих ділянках електрична тяга поїздів забезпечується електровозами ВЛ-8 та ДЕ-1. Синхронне осцилографування миттєвих величин фазних напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ на вході ТП, які живлять лише тяговий агрегат, виконували за допомогою двопроменного електронного осцилографа С1-93 з класом точності 2. При цьому для запису осцилограм струму вмикали 1-й канал приладу паралельно до безіндуктивного шунта (1,5А/75мВ), який був увімкнений послідовно з вторинною обмоткою трансформатора струму фази «С» живильної мережі ТП. Другий канал осцилографа використовували для одночасного запису фазної напруги, який вмикали паралельно до затишків вторинної обмотки вимірювального трансформатора напруги, тобто вмикали на напругу фази «С».

Гармонійний склад напруги та струму і результати чисельних розрахунків ПЯЕ

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 в вузлах приєднання навантаження (тягових підстанцій).

На рис. 1, а приведені осцилограми одного періоду мережевої напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ фази «А» на вході ТП з напругою живлення 6 кВ із шестипульсним випрямлячем в режимі тягового навантаження.

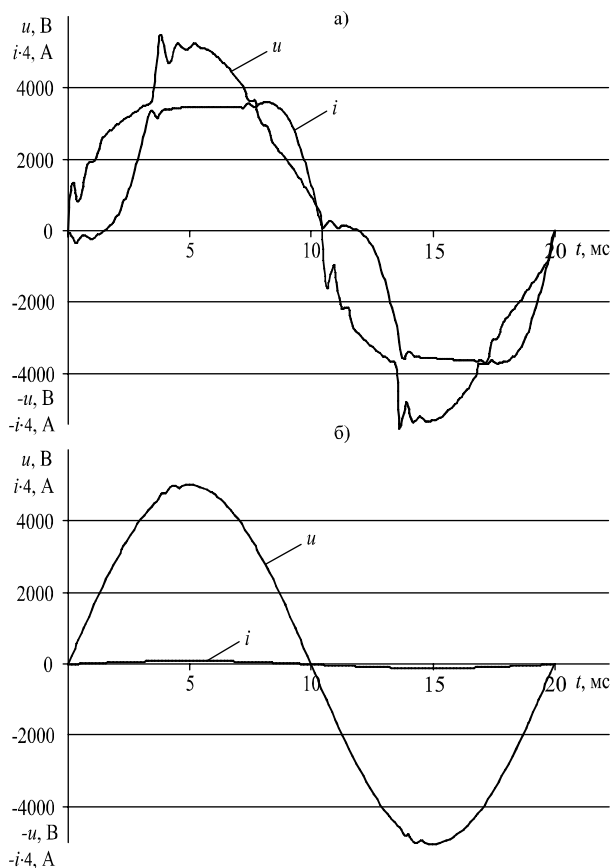


Рис. 1. Осцилограми вхідних напруги та струму до ТП «Горяїново»: а) в режимі тягового навантаження; б) в режимі холостого ходу.

Як впливає 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 несинусоїдність струму призводить до спотворення напруги. Підтвердженням такого впливу струму служать осцилограми на рис. 1, б: при струмі холостого хода випрямного агрегату, напруга має майже неспотворений синусоїдний характер.

Основний внесок в спотворення кривої струму вносять гармоніки 2, 4, 5, 6, 7 (рис. 2). Ті гармоніки, значення коефіцієнта n -ої гармонійної складової струму $K_{I(n)} = \frac{I(n)}{I_1} \cdot 100\%$ яких більше одиниці приведені в табл. 1.

Як впливає 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.

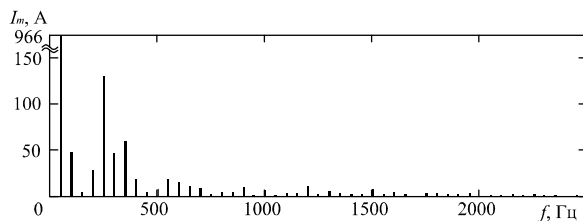


Рис. 2. Спектральний склад вхідного струму ТП «Горяїново».

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів n -ої гармонійної складової струму та інтегрального показника гармонійного складу струму I_{THD}

Коефіцієнти n -ої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %		I_{THD} , %
n -на гармоніка	$K_{I(n)}$, %	
2	5	17,1
4	3	
5	13,5	
6	4,7	
7	6,2	
8	2	
11	1,8	
12	1,6	
13	1,2	
18	1,1	
24	1,1	

При діючому значенні вхідного струму $I = 700$ А інтегральний показник гармонійного складу струму, згідно зі стандартом IEEE 519-1992, що визначається коефіцієнтом гармонік I_{THD} (THD – Total Harmonic Distortion):

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} (I^{(n)})^2}}{I^{(1)}} \cdot 100\%,$$

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. 3).

Їх коефіцієнти n -ої гармонійної складової напруги, згідно з ГОСТ 13109-97 [3],

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

подано на рис. 4. Ті гармоніки, значення n -ої гармонійної складової напруги яких перевищують норми згідно [3] та їх допустимі значення для даної напруги, приведені в табл. 2.

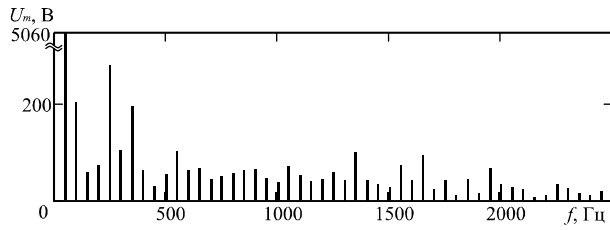


Рис. 3. Спектральний склад вхідної напруги до ТП «Горяїново»

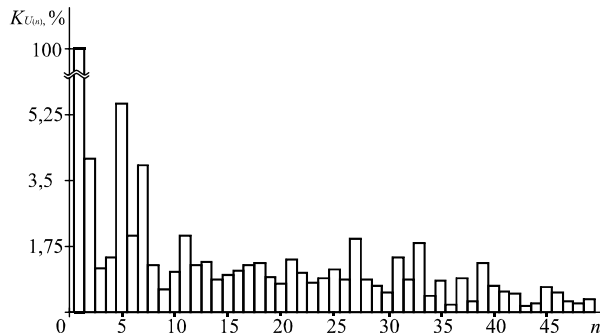


Рис. 4. Значення коефіцієнтів n -ої гармонійної складової вхідної напруги до ТП «Горяїново»

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

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

склав 10,5 %, що перевищує як нормально допустиме значення 6 %, так і гранично допустиме значення 8 % для цього рівня напруги. 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 розділі 3. Значення зазначених вище величин в кожній фазі склали: $S = 2497$ кВА; $P = 2430$ кВт; $Q_\phi = 575$ кВт.

Коефіцієнт потужності системи електротяги з шестипульсною схемою випрямлення склав $\lambda = 0,973$, а коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\phi = 0,273$. Як бачимо, коефіцієнт потужності не менше нормативного значення, що дорівнює 0,92...0,95. За аналогією, фактична величина

$\text{tg}\phi$ також не перевищує нормовану, що становить 0,25. Аналізуючи отримані величини, цікавим є той факт, що при таких значеннях λ та $\text{tg}\phi$, що задовольняють вимогам нормативної документації, значення K_U та K_I не задовольняють стандарту [3]. Тоді продуктивні (основні) втрати активної електроенергії в одному лінійному проводі живлячої ЛЕП, склали $\Delta W_i = 45,5$ кВт·год.

Таблиця 2

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

n -на гармоніка	Знач. $K_{U(n)}$, %	Норм. доп. знач., %	Гранич. доп. знач., %
2	4,06	1,5	2,25
4	1,46	0,7	1,05
5	5,53	4	6
6	2,04	0,3	0,45
7	3,89	3	4,5
8	1,24	0,3	0,45
9	0,6	0,5	0,75
10	1,07	0,3	0,45
11	2,03	2	3
12	1,24	0,2	0,3
14	0,87	0,2	0,3
15	0,99	0,3	0,45
16	1,11	0,2	0,3
18	1,29	0,2	0,3
20	0,74	0,2	0,3
21	1,39	0,2	0,3
22	1,03	0,2	0,3
24	0,88	0,2	0,3
25	1,12	1	1,5
26	0,85	0,2	0,3
27	1,95	0,2	0,3
28	0,85	0,2	0,3
30	0,52	0,2	0,3
31	1,43	0,63	0,945
32	0,86	0,2	0,3
33	1,82	0,2	0,3

Аналогічно, непродуктивні (додаткові), дорівнюють $\Delta W_d = 2,5$ кВт·год.

Такі самі дослідження проведено для ТП з 12-пульсною схемою випрямлення з вхідною напругою 35 кВ. На рис. 5 приведені осцилограми вхідних до ТП напруг і струмів.

Із порівняння їх з осцилограмами рис. 1, а випливає, що спотворення напруги і струму при 12-пульсній схемі випрямлення помітно менше, що закономірно, оскільки підтверджується факт впливу форм випрямлених тягових

напруги і струму на напругу і струм в лінії зовнішнього електропостачання. Також зменшився до 4 електричних градусів кут зсуву, між першими гармоніками напруги та струму. З осцилограм бачимо, що режим роботи системи тяги – активно-індуктивний. Особливо помітно менше, у порівнянні з 6-пульсними схемами, спотворення кривої напруги, що впливає із порівняння рис. 1, а і рис. 5. Основний вклад у несинусоїдність напруги вносять гармоніки 2, 3, 11, 12, 13 (рис. 6), що дещо не співпадає з літературними даними [1]. Їх коефіцієнти n -ої гармонійної складової напруги подано на рис. 7. Ті гармоніки, значення n -ої гармонійної складової напруги яких перевищують норми згідно з ГОСТ 13109-97 та їх допустимі значення для даної напруги, приведені в табл. 3.

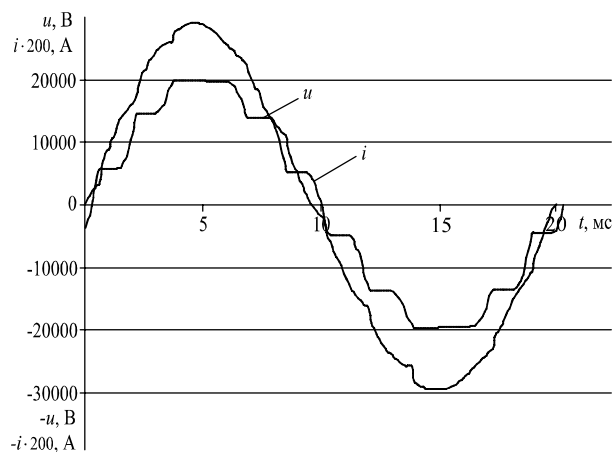


Рис. 5. Осцилограми вхідної напруги та струму до ТП «Н.-Д. Вузол»

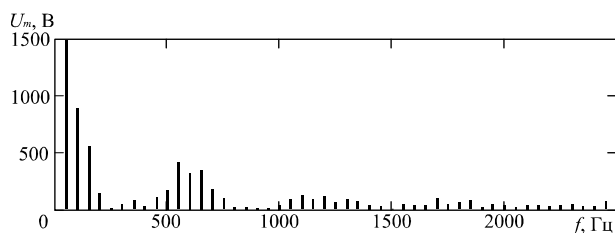


Рис. 6. Спектральний склад вхідної напруги до ТП «Н.-Д. Вузол»

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U , згідно з ГОСТ 13109-97, складає 4,60%, тобто перевищує нормально допустиме значення, яке дорівнює 4,0%, але менше гранично допустимого значення 6,0% для електричних мереж з $U_{ном} = 35$ кВ, якою є досліджувана ЛЕП.

Несинусоїдність струму в більшій ступені обумовлена гармоніками 2, 3, 10...14 (рис. 8), що, як і в напрузі, дещо не співпадає з літературними даними [1]. Значення коефіцієнтів n -

ої гармонійної складової струму від різних його величин представлено на рис. 9.

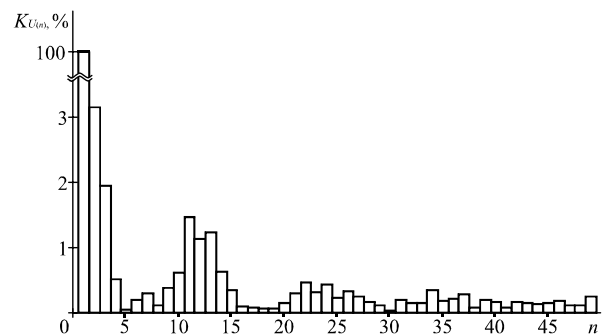


Рис. 7. Значення коефіцієнтів n -ої гармонійної складової вхідної напруги до ТП «Нижняодніпровськ-Вузол»

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів n -ої гармонійної складової вхідної напруги, які перевищують норми та їх допустимі значення

n -на гармоніка	Знач. $K_{U(n)}$, %	Норм. доп. знач., %	Гранич. доп. знач., %
2	3,14	1	1,5
3	1,94	1,5	2,25
4	0,51	0,5	0,75
10	0,61	0,3	0,45
12	1,12	0,2	0,3
14	0,63	0,2	0,3
15	0,34	0,3	0,45
22	0,45	0,2	0,3
24	0,42	0,2	0,3
26	0,33	0,2	0,3
27	0,24	0,2	0,3
34	0,35	0,2	0,3
36	0,2	0,2	0,3

Як відомо, несинусоїдний струм викликає несинусоїдний спад напруги на внутрішньому опорі мережі. Тому до гармонійного складу струму в останні роки, особливо в закордонній електроенергетиці, пред'являють все більші вимоги, які залежать від значення того ж внутрішнього опору ЛЕП і які визначаються по співвідношенню струмів КЗ і номінального [4].

Із аналізу коефіцієнтів спотворення гармонік впливає, що в різних режимах роботи системи тяги (тобто при різних струмах) 10, 11, 12,

13, 14, 22, 24, 25, 26 та 35 гармоніки перевищують максимально допустимі значення.

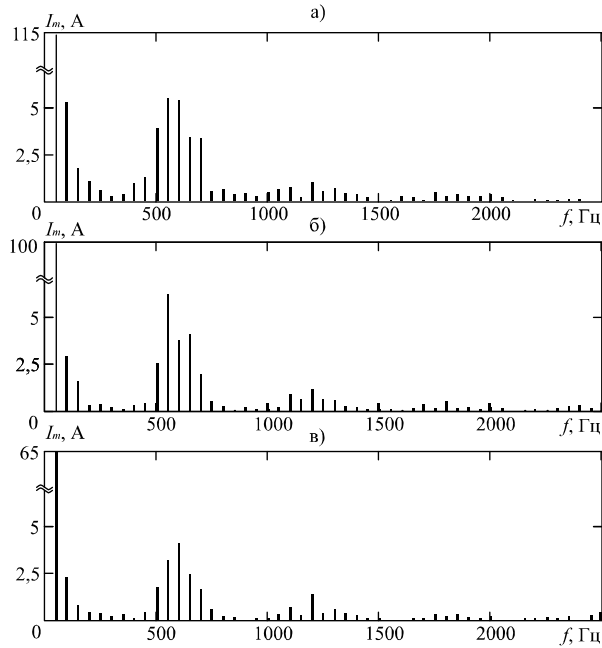


Рис. 8. Спектральний склад вхідного струму при його діючому значенні 45А (а), 70А (б) та 85А (в)

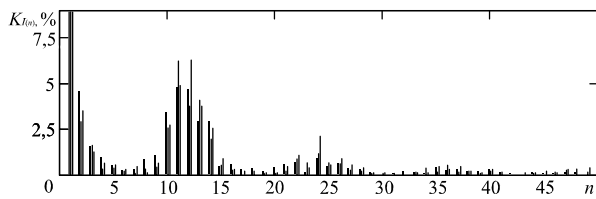


Рис. 9. Коефіцієнти n -ої гармонійної складової струму при його діючому значенні 45 А (а), 70 А (б) та 85 А (в)

Інтегральний показник гармонійного складу струму I_{THD} склав значення 9,91%, що значно перевищує допустиме значення 5% для цього рівня напруги.

Отримаємо значення складових повної потужності S та енергетичні показники для лінії, що живить 12-пульсний випрямляч за аналогією, як це зроблено в попередньому підрозділі. Їх значення по кожній фазі склали: $S=1426$ кВА; $P=2413$ кВт; $Q_0=194$ кВт. Коефіцієнт потужності системи електротяги $\lambda=0,991$, а коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi=0,137$. Як бачимо, коефіцієнт потужності системи при 12-пульсному випрямлячі ще більше наближається до одиниці, а коефіцієнт реактивної потужності – до нуля. І в той же час як коефіцієнти n -ої гармонійної складової, так і коефіцієнти спотворення синусоїдності кривої і напруги і струму напруги не задовольняють вимогам стандарту.

Основні (продуктивні) втрати активної електроенергії в одному лінійному проводі живлячої ЛЕП склали $\Delta W_1 = 278$ Вт·год. Аналогічно, додаткові (непродуктивні) дорівнюють $\Delta W_A = 378$ Вт·год.

Висновки

1. На вводах дослідженої ТП з вхідною напругою 6 кВ та 6-пульсним випрямлячем:

а) вхідні напруга та струм є суттєво несинусоїдними з $\varphi^{(1)} = +6^\circ$;

б) 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%;

в) 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 I_{THD} при вхідному $I = 700$ А складає 17,1 %, що перевищує нормативне значення.

2. На вхідних затискачах дослідженої ТП з напругою 35 кВ і 12-пульсним випрямлячем:

а) спотворення напруги і струму, у порівнянні з попередньою ТП, істотно, менше і $\varphi^{(1)}$ зменшився до $+4^\circ$;

б) основний вклад у несинусоїдність напруги вносять гармоніки 2,3,11,12 та 13, а сумарний коефіцієнт спотворення складає 4,6%, що перевищує нормативно допустиме 4,0%, але менше граничного 6%;

в) несинусоїдність струму в найбільшій мірі обумовлена гармоніками 2,3,10...14, а інтегральний показник $I_{THD} = 9,91\%$, що значно перевищує допустиме значення 5%.

3. Непроодуктивні втрати електроенергії в одному лінійному проводі живлячої ЛЕП для випадків розглянутих ТП відповідно склали: 2,5 та 0,38 кВт·год (або 8% від P і 94% від ΔP_0).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Шалимов, М. Г. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / М. Г. Шалимов. – М. : Транспорт, 1990. – 127 с.
2. Петров, А. В. Непроодуктивні втрати електроенергії в системі електропостачання електричної тяги постійного струму [Текст] : дис. ...

- канд. техн. наук / Петров Андрій Володимирович. – Д., 2011. – 227 с.
3. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст].
 4. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический

обзор) [Текст] / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский // Электротехника. – 1998. – № 3. – С. 10–17.

Надійшла до редколегії 25.01.2012.
Прийнята до друку 27.01.2012.

А. В. ПЕТРОВ О. И. САБЛИН

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Изложены результаты исследований, где анализируются численные значения некоторых основных показателей качества электроэнергии в линиях внешнего электроснабжения системы электрической тяги постоянного тока. В качестве дополнения приведены величины дополнительных и основных потерь электроэнергии в них.

Ключевые слова: показатели, электроэнергия, качество, коэффициент

A. V. PETROV, O. I. SABLIN

QUALITY ELECTRICITY LINES OF EXTERNAL POWER SYSTEMS ELECTRIC TRACTION DC

The results of studies that compare and analyze the numerical values of some key indicators quality electricity in the lines of the external power supply system the electric traction DC. As a supplement are additional and fundamental values of energy losses in them.

Keywords: performance, power, quality, factor