

УДК 621.316

**П.Є. Михаліченко, канд. техн. наук.**

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)*

## **ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ**

Забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) – це найважливіша проблема не тільки промислових підприємств [1], але й електрифікованого залізничного транспорту. Як відомо, ЯЕ нормується показниками якості електроенергії (ПЯЕ), систему яких, відповідно до ГОСТ 13109-97, утворюють наступні характеристики зміни напруги: відхилення і коливання напруги; ступінь несиметрії та несинусоїдності; провал напруги; зміна його частоти, а також імпульсна напруга і тимчасова перенапруга. Ці показники, по-перше відносяться до споживачів, які живляться від електричних мереж загального призначення трифазного і однофазного струму частотою 50 Гц, що працюють у стаціонарних (усталених) режимах. Тому, існуючі ПЯЕ можна назвати статичними або стаціонарними (СПЯЕ). Крім зазначеного, результати виміру СПЯЕ або усереднюються за часом, який рівний або кратний періоду основної частоти (або за 60, 20 і 3 с), або визначаються як діюче (середньоквадратичне) значення основної частоти. По-друге у такому СПЯЕ як імпульс напруги регламентується фронт імпульсу, який не повинен перевищувати 5 мс. Нарешті, ГОСТ 13109-97 регламентує збереження параметрів тільки напруги мережі живлення, залишаючи без уваги зміну струму.

Однак, як відомо, обидві системи електричної тяги працюють у нестационарних, часом навіть різконестационарних, динамічних (перехідних) режимах: практично безперервних експлуатаційних і найчастіше – аварійних. Безсумнівно, що ці режими помітно впливають на ЯЕ у системі, й тому необхідно знати ПЯЕ в цих режимах, які назвемо динамічними ПЯЕ (ДПЯЕ). Варто відзначити, що ГОСТ 13109-97 припускає в аварійних режимах вихід СПЯЕ за допустимі межі, але ні час, ні значення показників у цих режимах не обмовля-

ється, що також викликає необхідність визначення ДПЯЕ. На відміну від СПЯЕ, що характеризують збереження параметрів тільки напруги, ДПЯЕ повинні бути чинником оцінки і тягового струму (ТС).

Найбільш впливовими на ЯЕ і тому повинні бути детально досліджені є такі основні нестационарні режими: зникнення напруги живлення з наступним її відновленням як у самій системі енергопостачання, так і на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС); рушання з місця ЕРС, його розгін, перехід з одного з'єднання тягових двигунів на інше, перехід з позиції на позицію; різного роду короткі замикання (КЗ) у тяговій мережі й на ЕРС, замикання на землю; буксування і юз колісних пар ЕРС та інше. Не кажучи вже про зазначене, навіть експлуатаційні перехідні режими помітно впливають на форму ТС, тому що характеризуються середнім діапазоном зміни  $di/dt$  в межах 50–1300 А/с при максимальних кидках ТС до  $(1,5–1,7)I_{ном}$ , а аварійні –  $(1,5–20) \cdot 10^3 – (150–200) \cdot 10^3$  А/с при кидках струму  $(5–6)I_{ном}$ . Тривалість експлуатаційних перехідних процесів (ППр) становить у середньому 0,5 – 1,5 с, а аварійних 0,05 – 0,3 с.

При цьому не слід звертати увагу на короткочасність аварійних режимів. Наприклад, хоча режими КЗ у тяговій мережі й є короткочасними, до 0,2–0,25 с, але, по-перше, вони бувають частими, до 60 на один фідер в рік (при наявності 4–8 фідерів на тяговій підстанції), а, по-друге, стрибки струмів і напруг є багаторазовими стосовно сталого режиму, а тому їхній вплив як на ПЯЕ, так і на енергетичні характеристики системи значний.

Електровимірювальні прилади, здатні вимірювати ДПЯЕ, поки що відсутні. Крім того, складність оцінки ПЯЕ визначається тим, що спотворення і напруги, і струму в перехідних, особливо в аварійних, режимах являють собою неперіодичні імпульси довільної форми й тривалості (див. рис. 1), що не дозволяють застосовувати до них класичний Фур'є-аналізу.

Окремі види нестационарних динамічних спотворень напруги регламентуються ГОСТ 19705-89, але він призначений для систем електропостачання літаків і гелікоптерів. Враховуючи, що ЕРС, як навантаження, є параметричною й дуже динамічною подібно літакам і гелікоптерам, доцільно для систем електротяги розробити ГОСТ на ДПЯЕ, подібний ГОСТ 19705-89.

Зазначене вище й обумовлює необхідність розробки динамічних (миттєвих) ПЯЕ за типом миттєвого відхилення напруги [2]:

$$dU(t) = \frac{u(t) - U_{ном}}{U_{ном}}, \quad (1)$$

де  $u(t)$  – миттєве поточне значення напруги (найбільше або найменше);  
 $U_{ном}$  – номінальне значення.



Рис.1. Тимчасові залежності фідерної напруги і струму однієї з тягових підстанцій Придніпровської залізниці в режимі КЗ

Наведені вище міркування про ПЯЕ відносяться і до енергетичних характеристик (показників) системи електротяги і, зокрема, до коефіцієнта потужності  $l$ , і до коефіцієнта реактивної потужності  $tgj$ .

Як відомо, інтегральні величини  $l$  і  $tgj$  визначаються активною  $P$ , реактивною  $Q$  й повною  $S$  потужностями:

$$l = \frac{P}{S}; \quad (2)$$

$$tgj = \frac{Q}{P}. \quad (3)$$

У класичній електротехніці не передбачені поняття миттєвих  $l$  й  $tgj$ , тому запишемо їх виходячи з інтегральних виразів (2) і (3) у вигляді

$$l(t) = \frac{P(t)}{S(t)}; \quad (4)$$

$$tgj(t) = \frac{Q(t)}{P(t)}. \quad (5)$$

Одержимо спочатку  $l(t)$ , для цього запишемо інтегральний вираз (2) для  $l$  за довільний час  $T$  існування перехідних величин напруги  $u(t)$  і струму  $i(t)$ :

$$I(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}}, \quad (6)$$

де  $u(t)$  і  $i(t)$  на розглянутій ділянці часу  $T$  дискретизуємо на  $N$  рівних інтервалів  $\Delta T = T_{n+1} - T_n$ , а в межах інтервалу  $\Delta T$  у свою чергу розділимо  $u(t)$  й  $i(t)$  на  $M$  рівних інтервалів  $\Delta t = t_{m+1} - t_m$  (рис. 2), таким чином одержуємо, що  $T = N \cdot \Delta T$ , а  $\Delta T = M \cdot \Delta t$ , при цьому квантовані функції струму й напруги містять  $N \cdot M$  значень (відліків) досліджуваної величини  $a(t)$  (рис.2):  $a_1 = a(t_1)$ ;  $a_2 = a(t_2)$ ; ...,  $a_n = a(t_n)$ ; ...;  $a_N = a(t_N)$ ;  $m(n) = 1, 2, \dots, M$  ( $N$ )  $\Delta t = \frac{\Delta T}{M}$  – інтервал дискретизації в реальному масштабі часу.

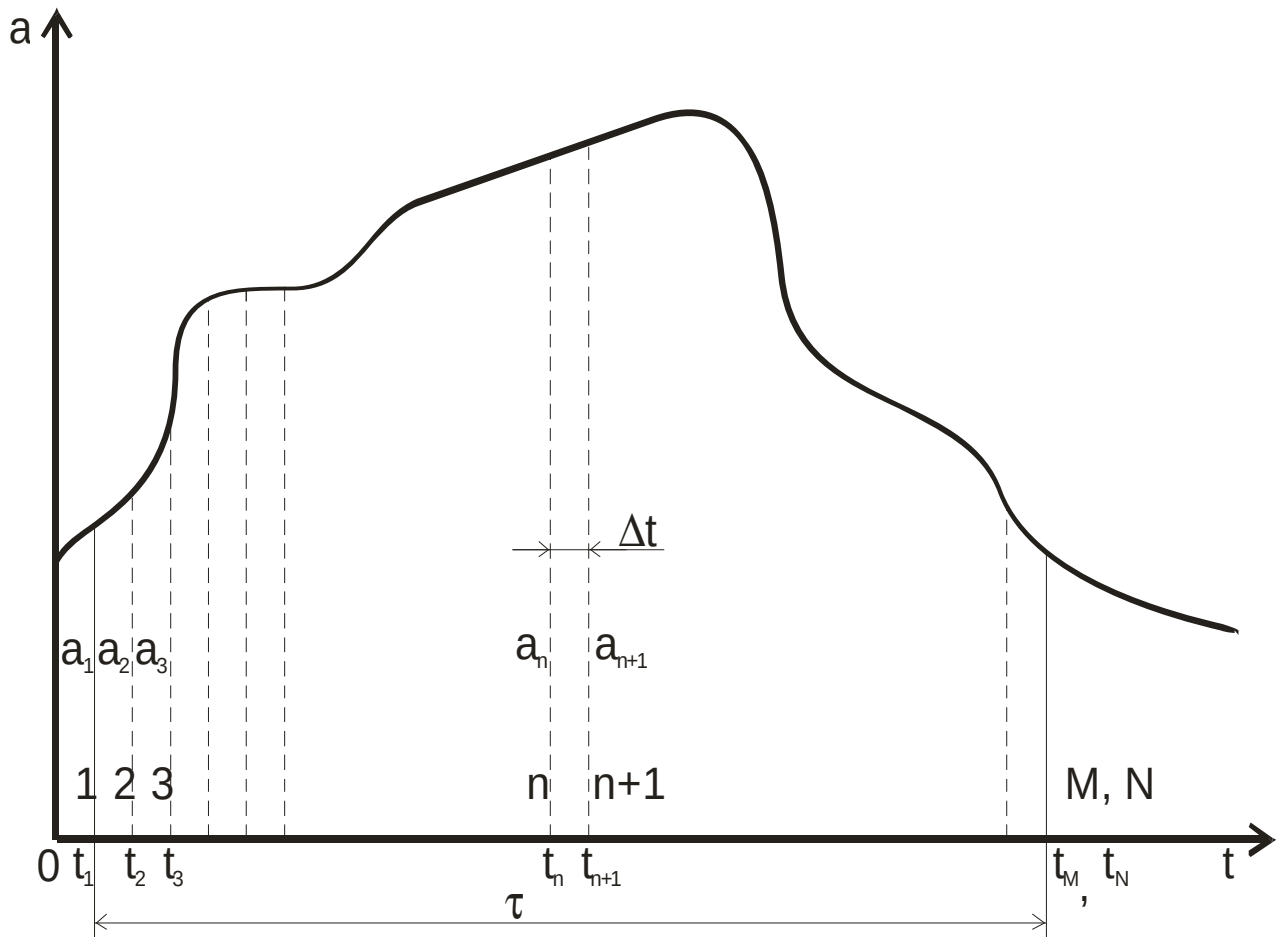


Рис. 2 Дискретизація неперервного імпульсу перехідної величини  $a(t)$

Далі введемо ранжовану змінну  $n = 1, 2, \dots, N$ , у результаті чого отримаємо можливість на  $N$  ділянках часу  $T$  визначити  $N$  значень активної  $P_n$  і повної  $S_n$  потужностей за  $M$  значеннями струму й напруги, тобто через інтервали часу  $T_n = \Delta T, 2\Delta T, \dots, N\Delta T$ , а значить визначимо незмінні значення потужностей і

відповідно коефіцієнт потужності в межах кожних ділянок  $\Delta T$ . Тоді для інтервалу часу  $\Delta T$  на рис. 2 можна записати значення коефіцієнта потужності як інтегральної величини у вигляді

$$l(t) = \frac{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} u(t)i(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} u(t)^2 dt} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} i(t)^2 dt}} = \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M u_m i_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M u_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M i_m^2 \Delta t}}, \quad (7)$$

де в чисельнику наведена споживана активна потужність на інтервалі часу  $\Delta T$ , а в знаменнику – повна потужність за той самий інтервал. Якщо взяти межу виразу (7) при  $\Delta T \rightarrow 0$  і  $\Delta t \rightarrow 0$  (а відповідно  $N \rightarrow \infty$  і  $M \rightarrow \infty$ ), причому  $\Delta t \ll \Delta T$ , тобто величина  $\Delta t$  – мала більш високого порядку, ніж  $\Delta T$  (рис. 2), тоді вираз (7) буде наближатися до значення  $l$  в цей момент часу, тобто до миттєвої величини коефіцієнта потужності

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta T \rightarrow 0}} \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M u_m i_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M u_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M i_m^2 \Delta t}} \rightarrow l(t), \quad (8)$$

Вважаючи в межах кожного з інтервалів  $\Delta T$  величини  $P$ ,  $S$  і відповідно  $l$  незмінними, можна розглянути як змінюються ці величини на інших інтервалах часу  $\Delta T$ , тобто одержуємо функції  $P(t)$ ,  $S(t)$  і  $l(t)$ .

Аналогічно визначається й миттєвий  $tgj(t)$ .

На рис. 3 наведені реалізації  $l(t)$  й  $tgj(t)$  у режимі КЗ тягової мережі однієї з міжпідстанційних зон Придніпровської залізниці.

Як бачимо з рис. 3, коливання і  $l$ , і  $tgj$  у дослідженому режимі значні. У нормованих, гранично припустимих, режимах вони досягають відповідно значень 0,92–0,95 і 0,25.

Отже, на сьогодні вимоги до ЯЕ поступово зростають, а тому, на думку автора, СПЯЕ (відповідно до ГОСТ 13109-97) повинні доповнюватися не тільки ДПЯЕ,  $l$  і  $tgj$ , як критеріями ефективності енергопроцесів, але і нормованими значеннями непродуктивних втрат електроенергії в пристроях електричної тяги. Останнє тим більше необхідне у зв'язку із застосуванням нових перетворювальних установок, енергетичних фільтрів на тягових підстанціях, використанням нових видів ЕРС, впровадженням прискореного й швидкісного руху, підвищення кількості великовагових потягів та інше.

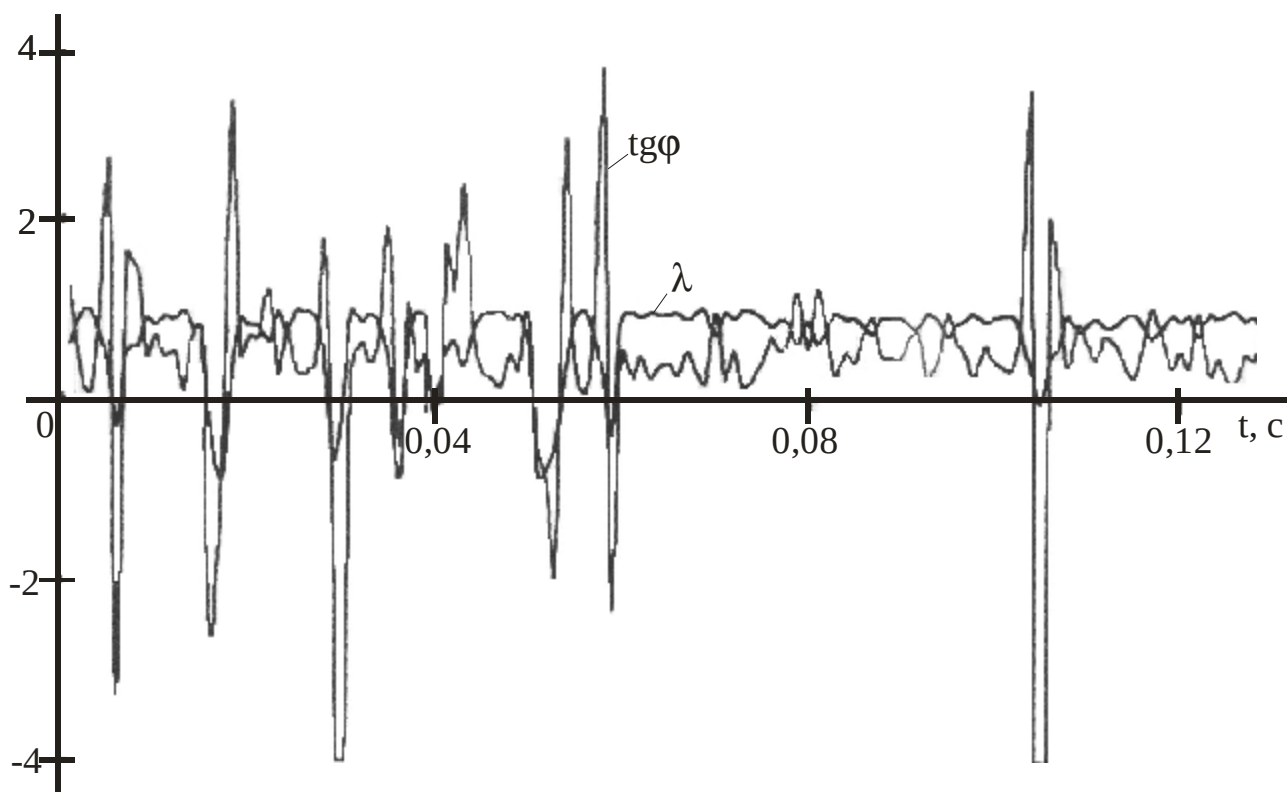


Рис.3. Миттєві (динамічні, перехідні) величини  $l(t)$  і  $tg\varphi(t)$  в режимі КЗ на одній з фідерних ділянок Придніпровської залізниці

#### Список літератури

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 261 с.
2. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий/ А.К. Шидловский, Б.П. Борисов, Г.Я. Вагин и др. — К.: Наук. думка, 1992 — 236 с.

*Рекомендовано до друку: професором Костіним М.О.*