

МИТТЄВА РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Половина магістрального і приміського, весь кар'єрний та шахтний, а також міський електричні транспорти експлуатуються на постійному струмі. Електровози, електропоїзди, мотор-вагони метрополітенів, трамваї та тролейбуси живляться постійною напругою, номінальними значеннями від 500 до 3000 В. При цьому традиційно, до цього часу, вважається, що ці електричні системи реактивну потужність не споживають. Тому їх коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg } \varphi = 0$, а коефіцієнт потужності $\lambda = 1$, що й обумовлює складання енергетичного балансу лише по активній енергії. Помилковість такого підходу пов'язана з тим, що при розрахунках енергопроцесів не враховують реально існуючі неперервні, часто значні, до того ж випадкові, зміни напруги живлення $U(t)$ і тягового струму $I(t)$ (рис.1 і рис.2, а), тобто системи електричного транспорту постійного струму (за назвою) по суті є системами змінного струму, що вимагає відповідного аналізу їх процесів.

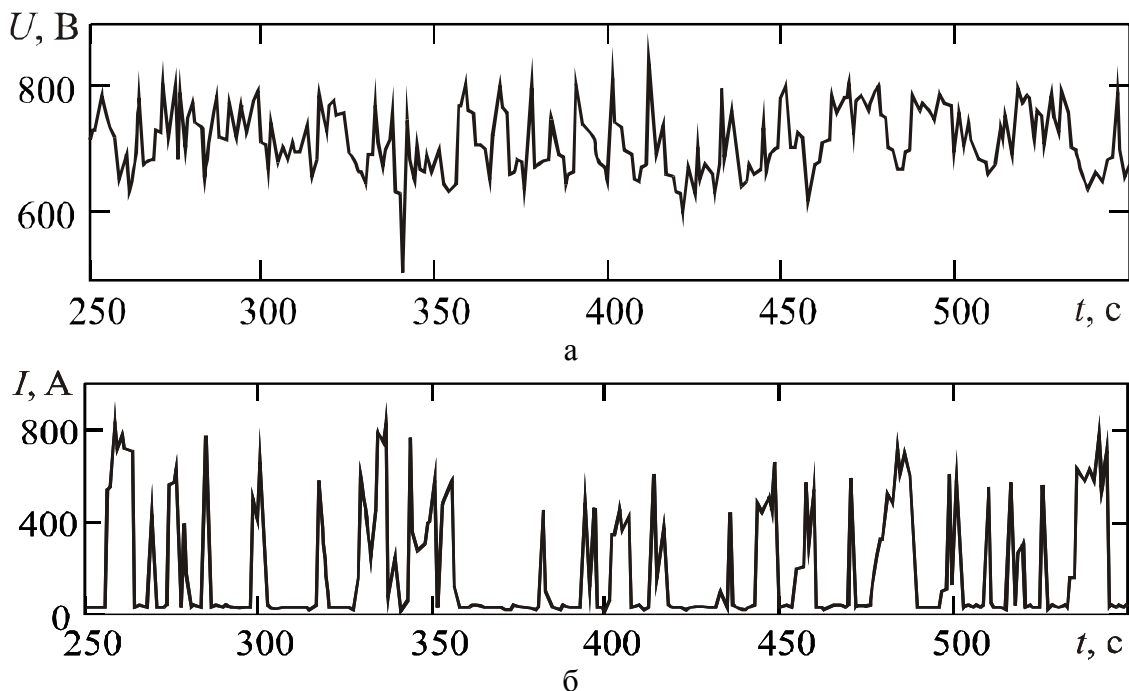
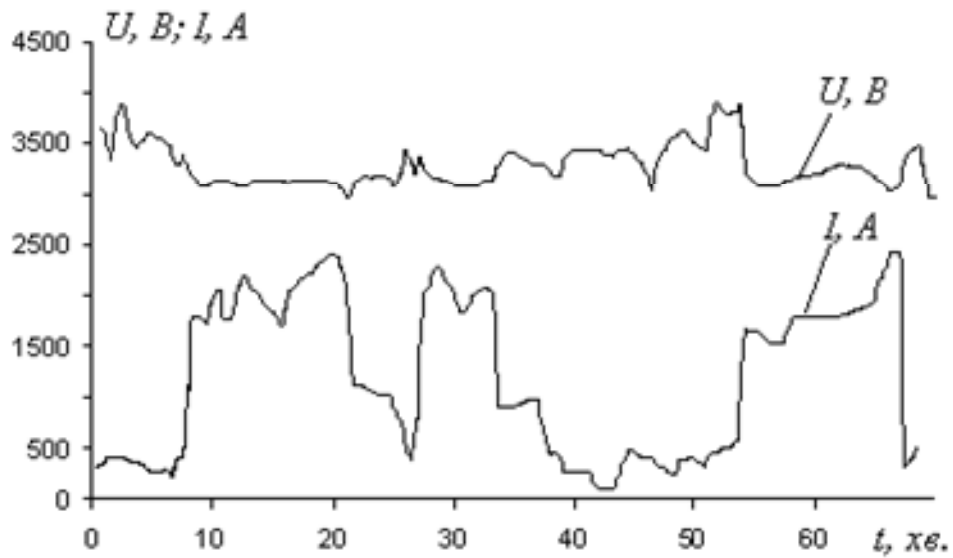
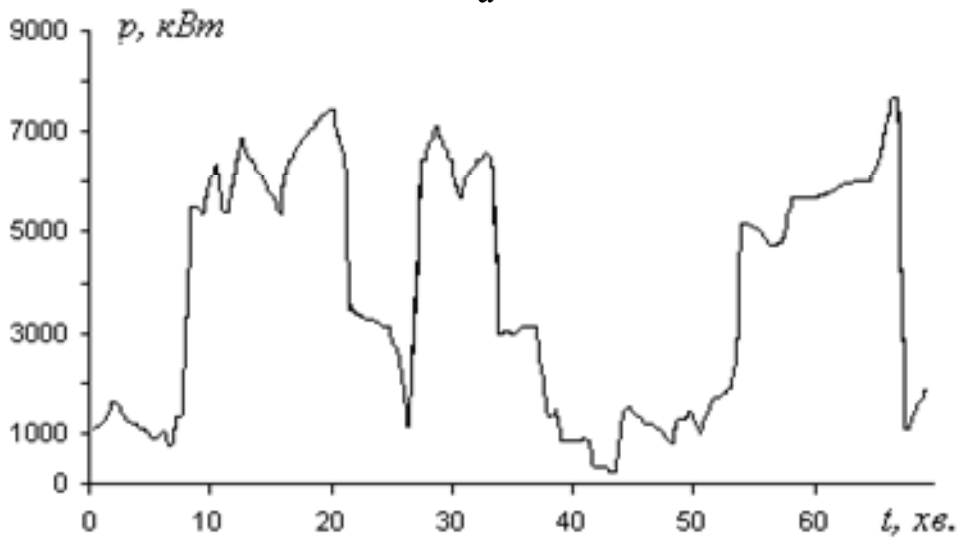


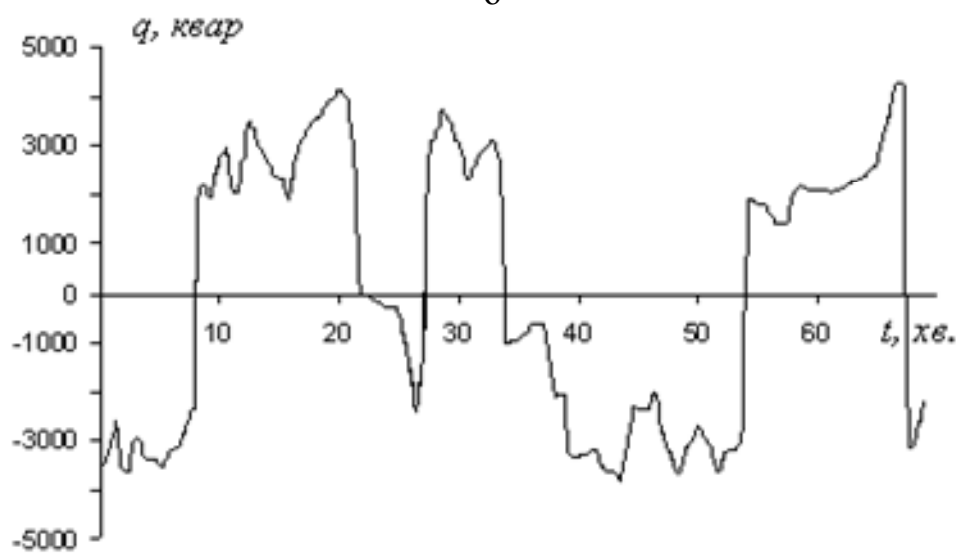
Рис. 1. Реалізація часових залежностей випадкових функцій напруги $U(t)$ на струмоприймачі (а) та тягового струму $I(t)$ трамвая (б)



а



б



в

Рис.2. Випадкові функції напруги та струму (а), миттєвої потужності (б) і миттєвої реактивної потужності (в) для однієї поїздки електровоза ДЕ1 на одній із ділянок Придніпровської залізниці

Змінний характер $U(t)$ та $I(t)$ свідчить про те, що пристрої електричного транспорту, окрім активної, також споживають реактивну потужність, визначення якої є необхідною задачею для оцінки шкідливих втрат і якості електроенергії. Однак у сучасній електроенергетиці питання щодо поняття і розрахунку реактивної потужності у колах з несинусоїдними електричними величинами є одним із самих протирічних і неоднозначних. Існує цілий ряд підходів і методик щодо визначення реактивної потужності [1-4], однак у більшості випадків вони базуються на математичних аналогіях і не мають строгого фізичного змісту. У нелінійних колах з несинусоїдними напругами та струмами реактивна потужність не може бути визначена якоюсь однією інтегральною характеристикою, подібною виразу

$$Q = UI \sin \phi, \quad (1)$$

що є чинним для кіл синусоїдного струму. Необхідно використовувати поняття миттєвої реактивної потужності $q(t)$ [5] так само як і поняття миттєвого струму, миттєвої напруги, миттєвої потужності; тому отримаємо вираз величини $q(t)$.

Представимо узагальнену електричну схему заміщення довільного навантаження (наприклад, системи електричного транспорту) у вигляді пасивного двополюсника з вхідною напругою $u(t)$, який являє собою паралельне з'єднання активного елемента з провідністю G і струмом $i_a(t)$ та реактивного елемента з провідністю B і струмом $i_p(t)$; вхідний струм $i(t) = i_a(t) + i_p(t)$. Активний елемент відображує втрати активної потужності у навантаженні, а реактивний – споживання неактивної складової потужності (потужності накопичення та потужності викривлення). Цей елемент B або не споживає енергію взагалі, або спочатку споживає її, а потім повертає джерелу.

Розглянемо декомпозицію вхідних напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ зазначеного вище двополюсника на ортогональні складові за допомогою процесу ортогоналізації Грама-Шмідта [6], який базується на твердженні, що, якщо $\{\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_k, \dots, \bar{A}_n\}$ – будь-яка кінцева або лічильна система лінійно незалежних векторів у гільбертовому просторі (базис), то існує така ортогональна система $\{\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_k, \dots, \bar{B}_n\}$, що породжує те ж саме лінійне багатотворення (де $\bar{B}_1 = \bar{A}_1$). Систему $\{\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_k, \dots, \bar{B}_n\}$ отримують за допомогою рекурентної формули:

$$\bar{B}_k = \bar{A}_k - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(\bar{A}_k \bar{B}_i)}{(\bar{B}_i \bar{B}_i)} \bar{B}_i, \quad (k = 2, 3, \dots, n), \quad (2)$$

де $(\bar{A}_k \bar{B}_i)$, $(\bar{B}_i \bar{B}_i)$ – скалярні добутки відповідних векторів.

Поставимо у відповідність: $\bar{A}_1 \sim \bar{U}$, $\bar{A}_2 \sim \bar{I}$, тоді згідно з виразом (2) у загальній формі можна записати, що

$$\bar{B}_2 = \bar{A}_2 - \frac{(\bar{A}_2 \bar{B}_1)}{(\bar{B}_1 \bar{B}_1)} \bar{B}_1$$

або конкретно, ортогональна до напруги \bar{U} складова струму \bar{I}_p у векторній формі буде:

$$\bar{I}_p = \bar{I} - \frac{(\bar{I} \bar{U})}{(\bar{U} \bar{U})} \bar{U}. \quad (3)$$

Тоді в інтегральній формі для довільного інтервалу часу $[0 \dots \tau]$

$$i_p(t) = i(t) - \frac{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau i(t) u(t) dt}{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau u^2(t) dt} u(t). \quad (4)$$

Чисельник другого доданку в (4) являє собою активну потужність P , що споживає навантаження (система транспорту), а знаменник – квадрат діючого значення вхідної напруги U^2 . Тоді вираз (4) можна записати як

$$i_p(t) = i(t) - \frac{P}{U^2} u(t). \quad (5)$$

Помноживши усі доданки формули (5) на вхідну напругу $u(t)$, отримаємо остаточний вираз миттєвої реактивної потужності $q(t)$ у вигляді

$$q(t) = p(t) - \frac{P}{U^2} u^2(t), \quad (6)$$

де $p(t) = u(t)i(t)$ – миттєва потужність навантаження.

Оскільки потужність $q(t)$ фізично характеризує швидкість обміну електромагнітної енергії $\frac{\partial W}{\partial t}$ між джерелом і навантаженням, то в загальному випадку вона також може бути записана виходячи з основ теорії електромагнітного поля:

$$q(t) = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right] dV = - \oint_S \vec{P} d\vec{S} - \int_V \gamma E^2 dV - \int_V \vec{J}_{nep} \vec{E} dV, \quad (7)$$

де V – об'єм середовища, яке обмежене замкненою поверхнею S і в якому існує електромагнітне поле; ϵ_a, μ_a – абсолютні відповідно діелектрична та магнітна проникності зазначеного середовища; E, H – напруженості відповідно електричного та магнітного полів; \vec{P} – вектор Пойнтінга; \vec{J}_{nep} – густина струму переносу.

Перший інтеграл $\left(- \oint_S \vec{P} d\vec{S} \right)$ у правій частині формули (7) являє собою потужність, що чисельно дорівнює тій енергії, яка поступає за одиницю часу в об'єм V крізь замкнену поверхню S .

Другий інтеграл $\left(\int_V \gamma E^2 dV \right)$ – це потужність теплових втрат від струму провідності в об'ємі V середовища, який володіє питомою провідністю γ . Нарешті, третій інтеграл $\left(\int_V \vec{J}_{nep} \vec{E} dV \right)$ – являє собою роботу, що витрачається в

одиницю часу на прискорення заряджених частинок в об'ємі V , де існує струм переносу \vec{J}_{nep} . Якщо ці частинки зіштовхуються з молекулами речовини середовища поля, то цей інтеграл є потужністю теплових втрат від струму переносу.

Поняття миттєвої реактивної потужності дозволяє розв'язати три основні задачі, що існують в електроенергетиці. По-перше, встановити фактичні наявність чи відсутність обмінних енергетичних процесів між джерелом і навантаженням. Дійсно, наприклад, згідно з рис. 2, б, якщо судити за класичною ознакою, тобто за знаком миттєвої потужності $p(t)$, то у силових колах електровоза обмінні процеси відсутні, оскільки $p(t) > 0$. Проте такий обмінний процес повинен бути, бо силові кола електровоза мають потужні нелінійні реактивні елементи: індуктивності обмоток якоря, обмоток головних та додаткових полюсів тягових двигунів, індуктивних шунтів. Виявлена невідповідність знаку миттєвої потужності та наявності обмінних процесів ще раз підтверджує, що класичні судження про обмінні процеси не є застосовуваними для нелінійних кіл з несинусоїдними струмами та напругами. Тому необхідно погодитись з поглядом [5], що для повного опису обмінних електромагнітних процесів необхідно розглядати миттєву реактивну потужність $q(t)$. Змінний за напрямком характер поведінки $q(t)$ (рис. 2, в) свідчить про обмінні електроенергетичні процеси між контактною мережею (як джерелом) та електровозом (як навантаженням). Обмінні процеси відсутні тільки у разі, якщо $q(t) = 0$ на протязі часу споживання електроенергії.

По-друге, знання $q(t)$ дозволяє оцінити втрати активної потужності від протікання реактивної потужності. Нарешті, поняття миттєвої реактивної потужності $q(t)$ дозволяє забезпечити оптимальну компенсацію реактивної потужності Q з точки зору мінімуму втрат потужності P у живлячій електричній мережі. Для повної компенсації Q потрібно, щоб миттєва реактивна потужність компенсуючого пристрою $q_k(t)$ точно відповідала миттєвій реактивній потужності навантаження $q(t)$ і знаходилася з нею у протифазі, тобто потрібно, щоб $q_k(t) = -q(t)$.

Таким чином, при аналізі електромагнітних процесів у нелінійних колах несинусоїдного струму потрібно використовувати поняття миттєвої реактивної потужності, а не її інтегральні характеристики.

Список літератури

1. Тонкаль В.Е. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Демирчян К.С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций // Изв. РАН. Энергетика. – 1992. – №1. – С. 3 – 18.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Современная концепция реактивной мощности // Вестник Приазовского госуниверситета. Мариуполь. – 1995. – С. 192-197.
4. Костін М.О., Шейкіна О.Г. Неоднозначність визначення поняття «реактивна потужність» у колах несинусоїдних електричних величин // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 69 – С. 3-7.
5. Саєнко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійним навантаженням: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук., Львів, 2003. – 36 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике – М.: Наука, 1968. – 720 с.