

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОТЯГОВИХ МЕРЕЖ СИСТЕМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### Вступ

Система електричної тяги постійного струму лише за назвою є системою постійного струму, а по суті системою змінних і напруги, і струму. Дійсно, електрорухомий склад працює в неперервних експлуатаційних перехідних режимах. Внаслідок цього і низки специфічних технологічних факторів ведення поїзда випрямлена напруга на струмоприймачі і тяговий струм мають різкозмінний випадковий характер зміни в часі. Внаслідок цього обмотки головних і додаткових полюсів, а також якорів тягових двигунів електрорухомого складу є потужними нелінійними індуктивними елементами, що споживають реактивну потужність, яка передається від тягової підстанції, перетікаючи по тяговій мережі, погіршує енергетичні показники і створює в ній додаткові непродуктивні втрати електроенергії. Тому при аналізі електроенергетичних процесів в системі тяги необхідно знання характеру часової зміни цієї потужності, як складової повної потужності, що передається електрорухомому складу.

Як відомо [1, 2], поняття і формули визначення реактивної потужності в мережах з несинусоїдними електричними величинами неоднозначні і до теперішнього часу дискусійні. Але практично всі дослідники одноставні, що при вирішенні задач аналізу втрат електроенергії та електричних показників в електромережах найбільш коректною і перспективною є концепція С. Фризе [3], згідно з якою реактивна потужність (по Фризе  $Q_{\Phi}$ ) визначається як нев'язка між повною  $S$  та активної  $P$  потужностями:

$$Q_{\Phi} = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (1)$$

Цю потужність  $Q_{\Phi}$  С. Фризе запропонував називати неактивною або фіктивною потужністю, тому що вона відрізняється від потужності зсуву, що класично називають реактивною потужністю в колах синусоїдного струму. Тим більше, що вона по суті містить всі складові, обумовлені всіма факторами неякості електроенергії: потужністю зсуву  $Q_{(1)}$ , потужністю

спотворення  $D$ , потужністю несиметрії  $H_C$ , потужністю нерівномірності  $H_P$ :

$$Q_{\Phi} = \sqrt{Q_{(1)}^2 + D^2 + H_C^2 + H_P^2}. \quad (2)$$

Згідно (1) і з урахуванням (2), величина  $Q_{\Phi}$  (надалі – реактивна потужність по Фризе або неактивна потужність) зберігає функціональний характер опису енергетичних властивостей ланцюгів при синусоїдних і несинусоїдних процесах. Так як фідерні і підстанційні напруги і струми є випадковими процесами, то і потужності, які визначаються на їхній основі, тобто  $S(t)$ ,  $P(t)$ ,  $Q_{\Phi}(t)$  теж є випадковими функціями часу. До цього додамо, що, за аналогією з публікаціями в галузі електроенергетики, будемо вважати потужності  $S$ ,  $P$ ,  $Q_{\Phi}$  енергетичними характеристиками, а коефіцієнт потужності  $\lambda(t) = P(t)/S(t)$  і коефіцієнт реактивної потужності  $(\operatorname{tg} \varphi)(t) = Q_{\Phi}(t)/P(t)$  – енергетичними показниками.

### Методики експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження виконували на діючих електрифікованих ділянках Горяїново – Сухачівка, Слав'янка – Миколаївка та Письменна – Ул'янівка Придніпровської залізниці.

Для запису часової залежності обвідної кривої випрямленої напруги тягової підстанції (ТП), необхідної для розрахунку енергетичних показників, застосовували ампервольтметр самописний переносний типу Н339 за №01280, який вмикали паралельно до вихідних затискачів дільника напруги (40/1), увімкненого до шин «+» і «-» ТП. Система приладу Н339 – магнітоелектричний з випрямлячем, клас точності – 1,5. Швидкість запису – 100...300 мм/год. Реєстрацію обвідної кривої випрямленого струму здійснювали за допомогою приладу того ж типу, з тією ж швидкістю запису, але за № 00129, який вмикали паралельно до шунта (3000А/75мВ) досліджуваного фідера.

Розрахунки повної  $S(t)$ , активної  $P(t)$  і реактивної (неактивної по Фризе)  $Q_{\Phi}(t)$  потужностей, а також коефіцієнта потужності  $\lambda$  і

коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$  виконано як «миттєві» (середньохвилинні), «погодинні» (середньогодинні) і «добові» (середньодобові) значення зазначених випадкових величин потужностей, коли одне значення (одну точку на графіках) розраховували як середньоарифметичне відповідно «за 10 хвилин», «за одну годину» і «за добу».

### Результати розрахунків та їх аналіз

Залежності зміни потужностей в часі, тобто  $S(t)$ ,  $P(t)$  і  $Q_\phi(t)$  (рис. 1 і 2) являються неперервними неперіодичними, більш того, стохастичними. Найбільш різкозмінними є «миттєві» графіки потужностей (рис. 1, а), потім «погодинні» (рис. 1, б) і найменш динамічними – «добові» (рис. 2). Закономірним і систематичним в цих графіках є те, що часова залежність повної потужності  $S(t)$ , що передається від ТП в тягову мережу (ТМ), знаходиться вище залежностей  $P(t)$  і  $Q_\phi(t)$ . Що ж стосується графіків останніх потужностей, то подібна закономірність відсутня: лінії кривих  $P(t)$   $Q_\phi(t)$  час від часу перетинаються. При цьому часто  $Q_\phi > P$ , що свідчить про значні перетоки реактивної потужності, які обумовлюють високі значення  $\text{tg}\varphi$  і непродуктивні втрати електроенергії (що буде показано далі).

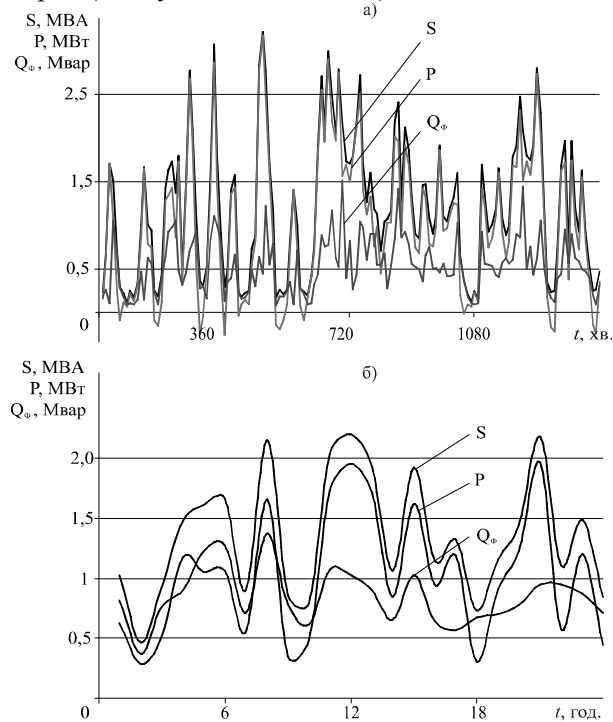


Рис. 1. Часові залежності потужностей, що передаються ТП «Слав'янка» в тягову мережу зони Слав'янка – Миколаївка: а – «миттєві» за 2 години; б – «погодинні» за добу.

Розкиди ( $\text{min}... \text{max}$ ) і «миттєвих», і «погодинних», і «добових» значень усіх трьох потужностей  $S$ ,  $P$ ,  $Q_\phi$  достатньо великі (наприклад, рис. 3).

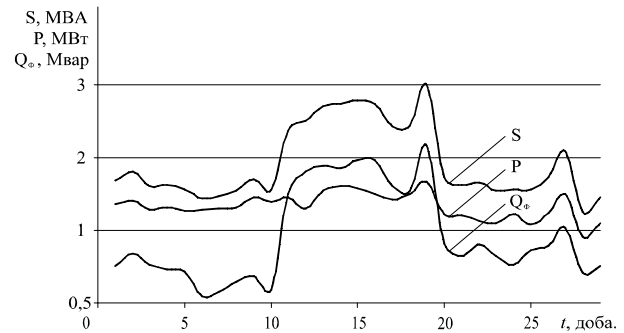


Рис. 2. «Добові» залежності повної  $S$ , активної  $P$  та неактивної  $Q_\phi$  потужностей, що передаються одним фідером ТП «Горяїново» (в напрямку Сухачівки).

Статистичні закони розподілення (гістограми) цих потужностей не відповідають закону Гауса, вони мають значний (до 1,3) додатний коефіцієнт асиметрії, а також значний (до 1,5) додатний ексцес. При цьому спостерігається більша імовірність попадання потужностей на ділянки їх менших значень. Виключення складають «добові» значення неактивної потужності (рис. 3), розподілення яких підкорюється нормальному закону.

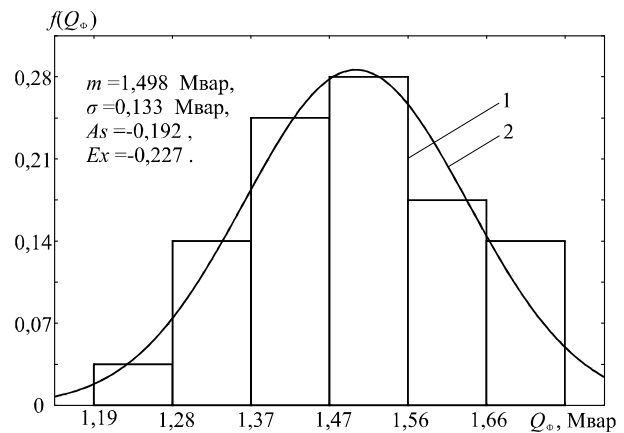


Рис. 3. Статистичний (1) і теоретичний (2) закони розподілення «добових» значень реактивної потужності по Фризе, що передається фідером ТП «Горяїново» на ділянці Горяїново-Сухачівка.

Різкозмінний характер поведінки «миттєвих» значень потужностей (рис. 1, а) обумовлює таку ж, і навіть більшу, динаміку зміни також «миттєвих» часових залежностей коефіцієнту потужності  $\lambda(t)$  і коефіцієнта реактивної потужності  $(\text{tg}\varphi)(t)$ . Менш динамічними є графіки «погодинних» значень  $\lambda$  та  $\text{tg}\varphi$  (рис. 4) і ще більш повільними – залежності «добових» значень (рис. 5).

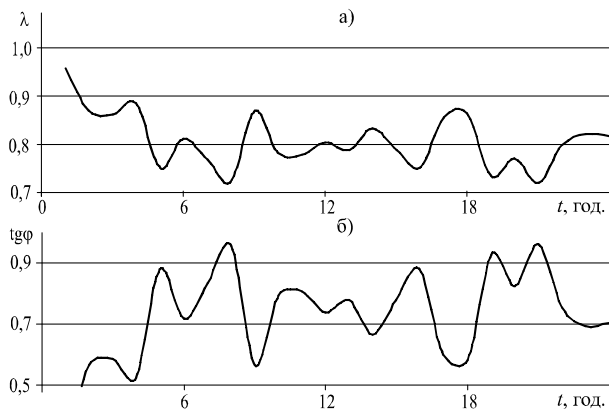


Рис. 4. Часові залежності «погодинних» значень коефіцієнта потужності  $\lambda$  (а) і коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$  (б) на шині 3,3 кВ ТП «Горяїново».

Причому характер кривих  $\lambda(t)$  і  $(\text{tg}\varphi)(t)$  є різним і в різні години, і в різні доби, тобто являються випадковими процесами, які однак будемо аналізувати (після дискретизації в часі) за теорією випадкових величин.

Характерною особливістю графіків рис. 5 є дуже низькі (0,36...0,38) значення  $\lambda$  і занадто високі (2,56...2,6) значення  $\text{tg}\varphi$  у перші 10 діб роботи мережі.

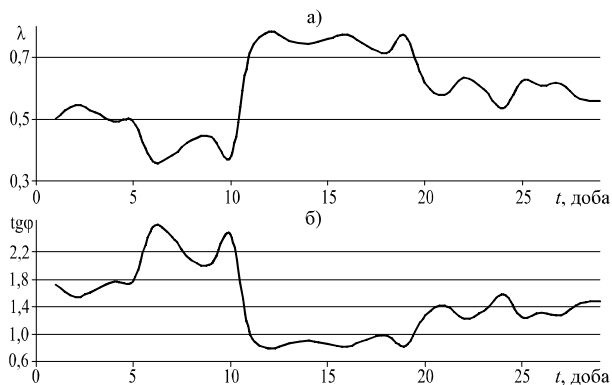


Рис. 5. Часові залежності «добових» значень коефіцієнту  $\lambda$  (а) і коефіцієнту  $\text{tg}\varphi$  (б) ТМ Горяїново-Сухачівка

За нашою думкою, причиною цього є недостатнє поїзне завантаження мережі (певно, мала маса поїздів), яке і обумовило невеликі значення активної потужності  $P$  (рис. 2), що передавались фідером ТП в тягову мережу, що й вплинуло на  $\lambda$  та  $\text{tg}\varphi$ .

Статистичні розподілення (гістограми), як випадкових величин, отриманих шляхом дискретизації в часі  $\lambda(t)$  і  $(\text{tg}\varphi)(t)$ , представлено на рис. 6. Розкиди «добових»  $\lambda$  і  $\text{tg}\varphi$  достатньо значні (рис. 5): відповідно 0,38...0,784 і 0,8...2,56, а середні значення коефіцієнта потужності  $\lambda$  менші від нормативних значень 0,92...0,95, а коефіцієнта  $\text{tg}\varphi$  – більше нормативного 0,25.

Стан дотримання цих нормативних значень «миттєвими» і «погодинними» величинами  $\lambda$  дещо кращий. Закон розподілення  $\lambda$  є «лінійно оберненим» закону розподілення неактивної потужності  $Q_{\text{ф}}$ , що цілком закономірно. Статистичне розподілення «погодинних» значень  $\text{tg}\varphi$  є близьким до Гаусса з  $As=0,22$  і ексцесом – 0,455, а «миттєвих» і «добових» – відмінне від нормального закону (рис. 6).

На завершення цього підрозділу треба підкреслити, що за даними гістограм для  $\lambda$  і  $\text{tg}\varphi$  можна зробити висновок, що коефіцієнт потужності  $\lambda$  є недостатньо досконалим енергетичним показником в колах несинусоїдного струму, якими є кола електротяги; більш точним і досконалим є коефіцієнт реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$ . Дійсно, на всіх гістограмах для «погодинних» випадкових значень  $\lambda$  їх найбільш імовірнісні величини зміщені до інтервалу 0,92...0,99, тобто до максимуму (при нормативних 0,92...0,95).

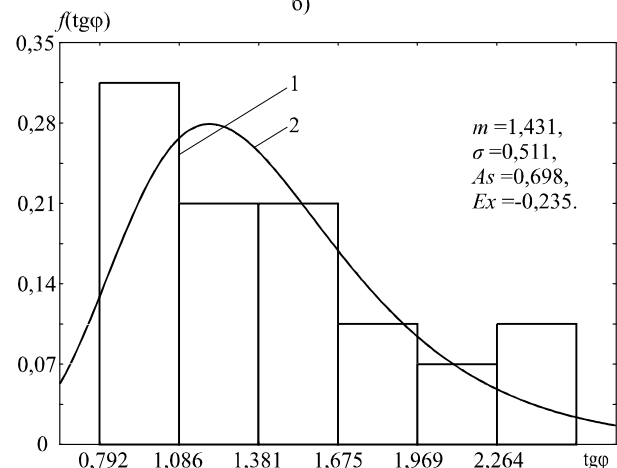
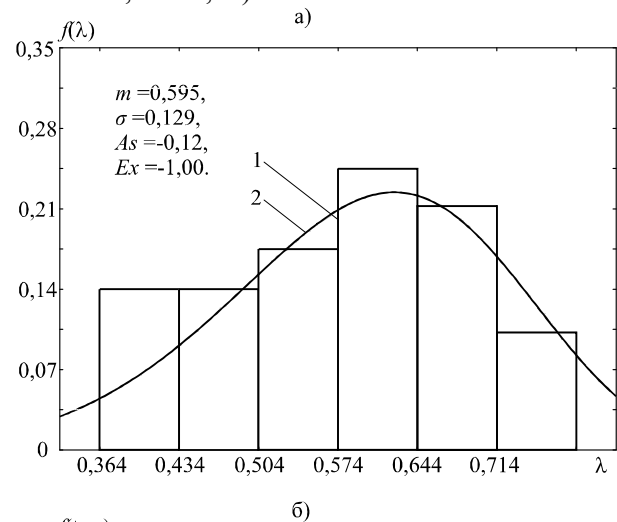


Рис. 6. Гістограми (1) та теоретичні (2) розподілення «добових» значень коефіцієнтів  $\lambda$  (а) і  $\text{tg}\varphi$  (б) ТМ Горяїново-Сухачівка.

В той же час як найбільш імовірнісні теж «погодинні» значення  $\operatorname{tg}\varphi$  для тих же умов зосереджені в межах 0,27...0,59 (при нормі 0,25). Тобто, якщо оцінювати енергетичні показники ТМ за значеннями  $\lambda$ , то вони задовольняють необхідним вимогам, а якщо по  $\operatorname{tg}\varphi$  – не задовольняють.

#### Висновки

1. Часові залежності потужностей, що передаються по тяговій мережі, а також енергетичні показники ( $\lambda$  і  $\operatorname{tg}\varphi$ ) є різкозмінними функціями.

2. Добові значення  $\lambda$  і  $\operatorname{tg}\varphi$  не відповідають нормативним значенням:  $\lambda < 0,92$ , а  $\operatorname{tg}\varphi > 0,25$ .

3. Коефіцієнт потужності  $\lambda$  є недостатнім енергетичним показником в колах несинусоїд-

ного струму; більш точним і досконалим є коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg}\varphi$ .

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.

2. Костін М. О. Неоднозначність визначення поняття «реактивна потужність» в колах несинусоїдних електричних величин / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2002. – Вип. 69. – С. 3-8.

3. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinustormigen Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elektrotechn. Z. – 1932. – Т. 25. – S. 596-599; Т. 26. – S. 625-627; Т. 29. – S. 700-702.