

М.О. КОСТІН (ДНУЗТ), О.Г. ШЕЙКІНА (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 3731537, ел. пошта: [nkoston@ukr.net](mailto:nkoston@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0856-6397](http://orcid.org/0000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674).

## БАЛАНС ЗА КОНЦЕПЦІЄЮ ФРИЗЕ ФІДЕРНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### Постановка задачі

Необхідність оцінки енергоефективності системи тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму вимагає в процесі її експлуатації здійснювати баланс енергії (потужностей, в тому числі і фідерних), на основі якого виробляються закони і алгоритми керування потоком електроенергії від тягової підстанції (ТП) до електрорухомого складу (ЕРС). Існуючі методи складання балансу не відповідають фізичній суті протікаючих в СТЕ процесів, оскільки останні є несинусоїдними, а методи орієнтовані на електроенергетичні системи, в яких діють синусоїдні електричні величини [1-5]. Ці методи тим більше не застосовні до СТЕ, оскільки фідерні напруги і струми являють собою стохастичні, до того ж різкозмінні, процеси (рис.1). Тому баланс фідерних потужностей в реально діючих СТЕ необхідно розглядати на основі нових поглядів (концепцій) реактивної потужності.

Виходячи із історії появи концепцій реактивної потужності [1,3-5], треба було б розглядати, як одну із перших, концепцію Будаєву [6], яка базується на частотному представленні напруг і струмів і згідно з якою реактивна потужність визначається як сума реактивних потужностей різних гармонік, отриманих шляхом класичного Фур'є-розкладання напруг і струмів:

$$Q_B = \sum_{k=1}^n U_k \cdot I_k \cdot \sin(\psi_{uk} - \psi_{ik}). \quad (1)$$

Однак такий підхід до визначення реактивної потужності, по-перше, не відображає реально протікаючі електроенергетичні процеси і, по-друге, не забезпечує істинності балансу складових повної потужності  $S$ , так як

$$S^2 \neq P^2 + Q_B^2. \quad (2)$$

Більшість дослідників [1] вважають більш перспективною концепцію Фризе [7], яка, по-перше, направлена на збереження

функціонального характеру викладення енергетичних властивостей електричних кіл при синусоїдних і несинусоїдних процесах і, по-друге, забезпечує складання балансу:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (3)$$

Для підтвердження функціональної переваги концепції Фризе над поглядами Будаєву в таблиці приведені результати визначення реактивної потужності по Фризе і по Будаєву для десяти дослідів, виконаних на одній із фідерних ділянок Придніпровської залізниці.

Як впливає із виразу (3), для оцінки балансу складових повної фідерної потужності  $S$  за концепцією Фризе потрібно визначати активну  $P$  і реактивну по Фризе  $Q_F$  потужності.

Таблиця 1

Складові балансу потужностей

№№ дослідів	Реактивна потужність		Активна і повна потужності	
	по Фризе $Q_F \cdot 10^6$ , вар	по Будаєву $Q_B \cdot 10^6$ , вар	$P$ , $\cdot 10^6$ , Вт	$S \cdot 10^6$ , ВА
1	2,628	-0,0237	3,723	4,565
2	2,274	-0,0045	3,478	4,166
3	2,487	-0,0028	3,696	4,465
4	2,297,	-0,0170	3,640	4,316
5	2,694	0,0417	3,804	4,670
6	2,161	0,0483	2,956	3,673
7	2,224	-0,063	2,814	3,603
8	1,230	0,0154	1,666	2,096
9	2,162	0,0413	3,124	3,810
10	1,436	-0,0384	1,802	2,330

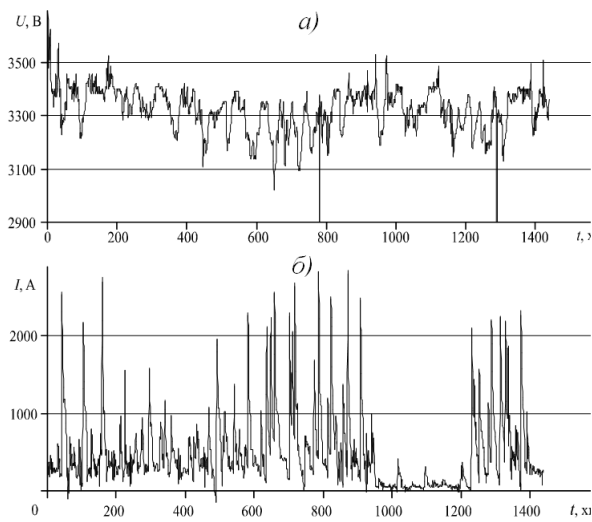


Рис. 1. Реєстрограми напруги (а) і струму (б) фідера ТП постійного струму

### Методика та прилади експериментальних досліджень

На ТП постійного струму відсутні методи і прилади вимірювання складових повної потужності, здійснюється лише реєстрація витрат електроенергії: на вході ТП – електронними лічильниками типу «Альфа» класом точності 0,5, а в колі фідерів – лічильниками індукційної системи. Ці лічильники можливо було б використати для непрямого визначення потужностей. Однак, розроблені відносно недавно електронні лічильники з високою точністю, практично без помилок, працюють тільки в ustalених режимах, тільки при синусоїдних напругах і струмах, і тільки в симетричних системах. В інших випадках, тобто в інших системах, якими і є СЕТ постійного струму, існуючі лічильники можуть вимірювати адекватно лише активну потужність, всі інші енергетичні характеристики оцінюються з істотними похибками [8-11]. Особливо ці похибки зростають, якщо напруги й струми є різкозмінними величинами й, більше того, являють собою випадкові процеси, що є характерним для електричних кіл фідерів.

Що ж стосується індукційних лічильників, які розташовані в тягових колах випрямних напруг і струмів, то ситуація з вимірюванням електроенергії ще в більш некоректному і тому невизначеному стані. Це обумовлено тим, що індукційні лічильники являються приладами застарілої конструкції, володіють низьким класом точності 2,0 і тому мають високу помилку. Згідно з дослідженнями [12], математичне очікування помилки  $m_\gamma$  складає

не менше 5%, а її середньоквадратичне відхилення  $\sigma_\gamma = 2,57\%$ . При цьому автори [12] стверджують, що фактичне значення максимальної помилки індукційних лічильників в колах фідерів ТП постійного струму треба визначати як  $\gamma_{\max} = m_\gamma + 2 \cdot \sigma_\gamma$  і тоді вона складе 10,4%. В результаті цього показання цих лічильників є малодостовірними.

У зв'язку з викладеним вище, найбільш правильних шлях оцінки складових повної потужності розрахунковий, точніше, експериментально-розрахунковий, бо він базується на експериментально отриманих у реальних експлуатаційних умовах реєстрограмах зміни в часі фідерних напруг  $U(t)$  і струмів  $I(t)$ . Цей метод позитивно відрізняється ще й тим, що розрахунки виконують на основі сучасних уявлень і формул потужностей в електричних колах зі стохастичними електричними процесами, в той же час як існуючі вимірювальні прилади і системи базуються на поняттях і методиках, які були прийняті ще в 40-ві роки ХХ століття.

В роботі реєстрацію часових залежностей фідерних напруг  $U(t)$  і струмів  $I(t)$ , необхідних для визначення потужностей  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ , здійснювали на виході реально діючих тягових підстанцій А, В, С електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці відповідно до спеціально розроблених програм [13]. Для запису  $U(t)$  застосовували ампервольтметр самописний переносний типу Н339, який вмикали паралельно до вихідних затисків дільника напруги (40/1), увімкненого до шин «+» і «-» тягової підстанції. Прилад Н339 відноситься до приладів магнітоелектричної системи з випрямлячем, має клас точності 1,5 і швидкість запису 100...300 мм/год.

Синхронно з  $U(t)$  реєстрували і криву струму  $I(t)$ , для чого використовували прилад того ж типу Н399, який вмикали паралельно до шунта (3000 А/75 мВ) досліджуваного фідера.

### Метод визначення потужностей

За останнє десятиріччя розроблено чотири розрахункових методи визначення складових повної потужності в колах зі стохастичними процесами. Зокрема, в [14] запропоновано, так званий, метод «дискретної електротехніки» і метод дискретного перетворення Фур'є, а в [15, 16] – метод кореляційних функцій і

відповідно кореляційно-дисперсійний метод. Із порівняння цих методів, яке виконано в роботах [13, 17], випливає, що всі методи дають адекватні результати з різницею, що не перевищує 2%. Однак, за нашою думкою, найпростішим є метод «дискретної електротехніки», розвинутий варіант якого використано в цій роботі; його сутність полягає в наступному.

Кожну реалізацію тривалістю  $T$  (найчастіше добу) заданих випадкових функцій напруги  $U(t)$  й відповідну їй реалізацію струму  $I(t)$  або миттєвої потужності  $p(t)$  дискретизують на певному інтервалі часу  $[0, \tau]$  з інтервалом  $\Delta t$ , обираючи відповідно до теореми Котельникова [18] (рис. 2):

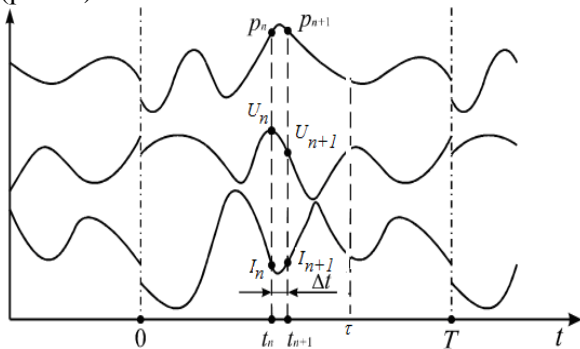


Рис.2. Реалізації часових залежностей миттєвих величин напруги  $U(t)$ , струму  $I(t)$  та потужності  $p(t)$

$$t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t$$

$$N = \frac{\tau}{\Delta t}$$

де  $N$  – загальна кількість точок часового квантування за термін часу  $[0, \tau]$ .

В результаті маємо дискретні значення напруги  $U(t)$  й струму  $I(t)$ :

$$U(t_1) = U_1, U(t_2) = U_2, \dots, \\ U(t_n) = U_n, \dots, U(t_N) = U_N,$$

$$I(t_1) = I_1, I(t_2) = I_2, \dots, \\ I(t_n) = I_n, \dots, I(t_N) = I_N.$$

Тоді миттєва потужність у довільній момент часу  $t_n$  дорівнює:

$$p(t_n) = p_n = U(t_n) \cdot I(t_n) = U_n \cdot I_n, \quad (4)$$

а активну потужність знаходять як середнє арифметичне значення від  $p_n$  за інтервал часу  $[0, \tau]$  [14]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n \cdot I_n \quad (5)$$

На перший погляд активну потужність  $P$  для розглядуваних режимів можна визначити і як добуток середніх значень за час споживання енергії системою напруги  $U_{\text{ср}}$  та струму  $I_{\text{ср}}$ :

$$P_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} \quad (6)$$

де

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n, \quad (7)$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n.$$

Однак значення потужності  $P$  в цьому разі будуть менш точні, бо тоді активна потужність визначається лише потужністю нульової гармоніки (якщо припустити можливість розкладення  $U(t)$  та  $I(t)$  у ряд Фур'є), оскільки  $U_{\text{ср}} = U^0$ ,  $I_{\text{ср}} = I^0$ .

Повну потужність  $S$  визначають за відомою із теорії кіл несинусоїдного струму формулою

$$S = U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}} \quad (8)$$

де діючі значення реалізації випадкових процесів напруги  $U_{\text{д}}$  та струму  $I_{\text{д}}$  знаходять як середні квадратичні значення за термін часу  $[0, \tau]$  від дискретних значень відповідних величин (рис. 2):

$$U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n^2}, \quad (9)$$

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n^2}.$$

Реактивну потужність (по Фризе) визначають як:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (10)$$

Значення потужностей  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ , що визначаються за виразами (5), (8), (10), в залежності від прийнятого інтервалу часу  $[0, \tau]$  будуть різними і до того ж випадковими. У свою чергу, у подальшому у цій роботі інтервал  $[0, \tau]$  приймався в залежності від тривалості  $[0, T]$  реалізацій випадкових  $U(t)$  і  $I(t)$ , отриманих експериментально в реальних умовах експлуатації. В результаті оцінювали такі значення  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ : так звані «миттєві», коли одне значення потужності (одну точку на графіку потужності) розраховували як середньоарифметичне за 10 хвилин, тобто, при цьому  $[0, \tau] = 10$  хв;

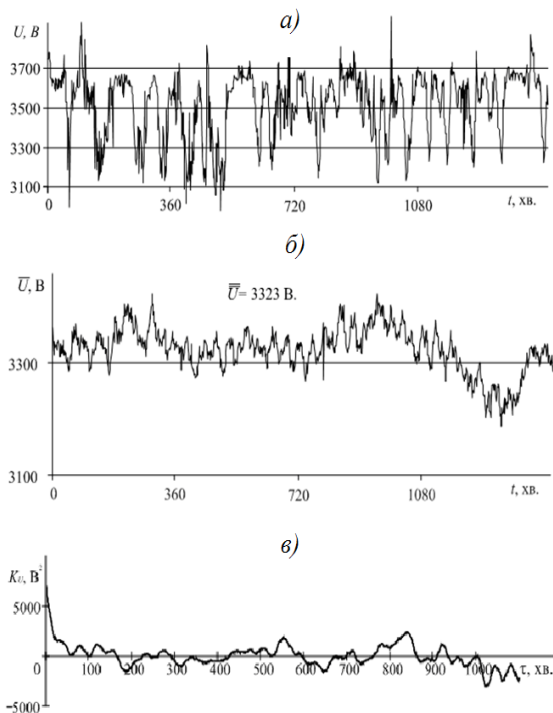


Рис. 3. Реалізація випадкового процесу фідерної напруги ТП «А» (а), її функція математичного очікування (б) та кореляційна функція (в)

Як впливає із рис. 3, а і рис. 4, а, випадкові процеси  $U(t)$  і  $I(t)$  протікають в часі приблизно однорідно і мають вигляд неперервних випадкових коливань навколо деякого середнього значення. При цьому ні характер цих коливань, ні середня їх амплітуда не виявляють суттєвих змін в часі. Зазначене, як відомо [19, 20], є властивим, але недостатнім, для стаціонарних випадкових процесів. Суворо кажучи, існує три умови стаціонарності стохастичного процесу: постійність функції математичного очікування

«погодинні», коли  $[0, \tau] = 1$  год; «добові», коли  $[0, \tau] = 1$  доби.

### Характер зміни фідерних процесів

Викладений вище метод «дискретної електротехніки» застосовний у випадку якщо досліджувані випадкові процеси являються стаціонарними ергодичними. Тому далі проаналізуємо, чи відповідають цим умовам фідерні напруга  $U(t)$  і струм  $I(t)$ .

На рис. 3 і 4 приведені реалізації фідерної напруги  $U(t)$  і струму  $I(t)$  тягової підстанції А (а), функція математичного очікування напруги (рис. 3, б) та кореляційні функції напруги (рис. 3, в) і струму (рис. 4, б, в).

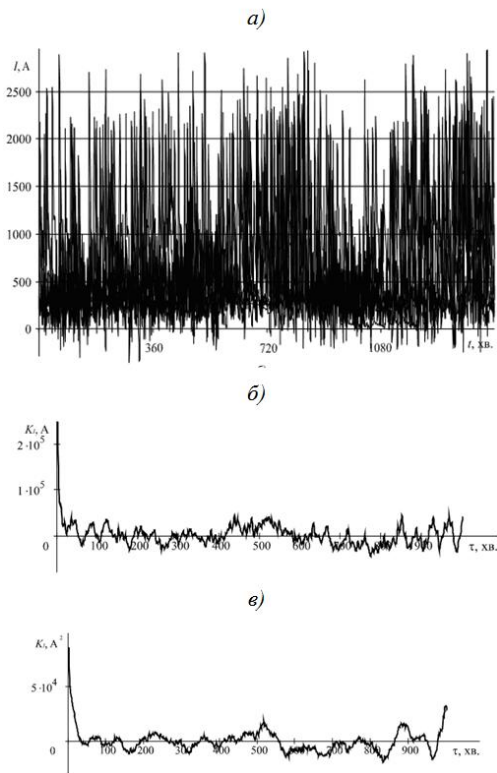


Рис. 4. Десять реалізацій випадкового процесу фідерного струму ТП «А» (а) та кореляційні функції фідерних струмів тягових підстанцій «А» (б) і «С» (в)

( $m_x = \text{const}$ ) і дисперсії ( $D_x = \text{const}$ ), а також щоб кореляційна функція процесу  $X(t)$  була функцією одного аргумента. Однак, умова стаціонарності будь-якого процесу, а отже і  $U(t)$ , і  $I(t)$ , що  $m_U(t) = \text{const}$  і  $m_I(t) = \text{const}$  не є суттєвою [19], оскільки від випадкових функцій  $U(t)$  і  $I(t)$  можна перейти до центрованих випадкових функцій  $\overset{o}{U}(t) = U(t) - m_U(t)$ ,  $\overset{o}{I}(t) = I(t) - m_I(t)$ , для яких математичні

очікування дорівнюють нулю й тим самим ця умова виконується.

Друга умова відносно стаціонарності дисперсій ( $D_U(t) = \text{const}$ ,  $D_I(t) = \text{const}$ ) є частковим випадком третьої умови, згідно з якою кореляційні функції напруги і струму повинні бути функціями одного аргумента, тобто

$$K_U(t, t') = K_U(t, t + \tau) = K_U(\tau)$$

$$K_I(t, t') = K_I(t, t + \tau) = K_I(\tau)$$

Як показує аналіз кореляційних функцій  $K_U(\tau)$  і  $K_I(\tau)$ , представлених на рис. 3 і 4, ця умова виконується у повній мірі і тоді виконується друга умова відносно стаціонарності дисперсій напруги і струму. Отже, випадкові процеси фідерних напруги і струму можна вважати стаціонарними процесами.

Окрім зазначеного, згідно з рис. 3 і 4, кореляційні функції  $K_U(\tau)$ ,  $K_I(\tau)$  загасають до нуля, а потім починають здійснювати

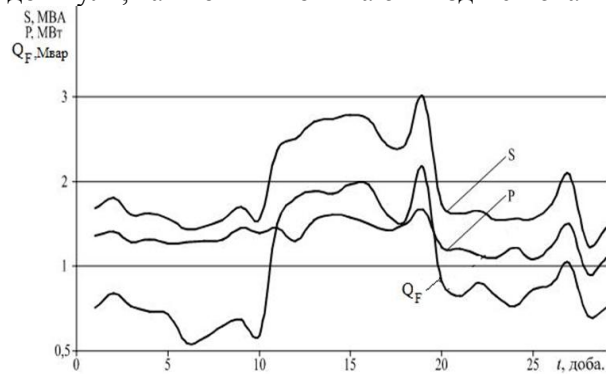


Рис. 5. «Добові» значення фідерних повної  $S$ , активної  $P$  та реактивної (по Фризе)  $Q_F$  потужностей ТП «А»

Закономірним і систематичним в цих графіках є те, що часова залежність повної фідерної потужності  $S(t)$  знаходиться вище залежностей її складових  $P(t)$  і  $Q_F(t)$ . Що ж стосується графіків останніх потужностей, то подібна закономірність (що  $S$  більше  $P$  і  $Q_F$ ) відсутня: лінії кривих  $P(t)$  і  $Q_F(t)$  час від часу перетинаються. Останнє свідчить про те, що часто в певний інтервал часу роботи того чи іншого фідера ТП має місце нерівність  $P(t) < Q_F(t)$ , тобто, перетоки реактивної потужності перевищують потужність споживання.

Це впливає також із діаграм балансу складових фідерних потужностей

невеликі нерегулярні коливання навколо вісі абсцис (а не якоїсь постійної величини), що є основною ознакою ергодичності випадкових процесів [19, 20].

Отже, стохастичні процеси фідерних напруг і струмів являються стаціонарними ергодичними процесами, що дозволяє у подальших імовірнісно-статистичних аналізах користуватись не ансамблем реалізацій, а однією реалізацією достатньої тривалості.

### Результати та аналіз чисельних розрахунків

Різкозмінний характер «поведінки» стохастичних процесів фідерних напруг і струмів (рис. 1, 3 і 4), істотно, обумовлює також випадковий характер зміни часових залежностей потужності  $S(t)$  та її складових  $P(t)$ ,  $Q_F(t)$ , по одній реалізації яких представлено на рис. 5 і 6.

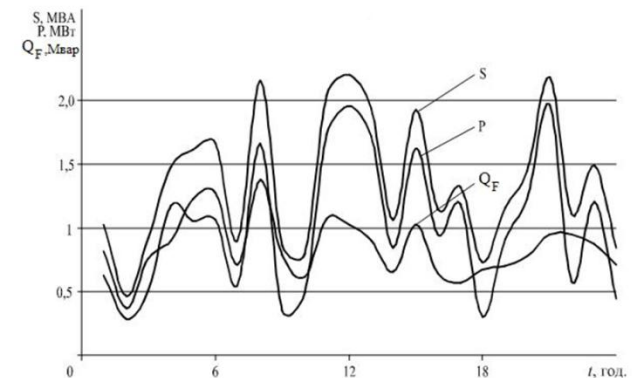


Рис. 6. «Погодинні» значення фідерних потужностей ТП «С»

(рис. 7): для фідерів тягової підстанції А величина квадрату реактивної потужності по Фризе  $Q_F^2$  складає 61,11%, а активної потужності – 38,89%, хоча в значно більшості випадків  $P(t) > Q(t)$ . Імовірно, такий стан в балансі потужностей обумовлений технологічним характером навантаження фідерної ділянки: кількістю, масою та швидкістю руху поїздів.

Статистичні закони розподілення повної потужності і її складових не відповідають закону Гуасса, вони мають значний (до 1,5) додатний коефіцієнт асиметрії, а також значний (до 1,7) додатний ексцес (рис. 8), що свідчить про чітке скошення розподілення

вліво, в бік більшої імовірності попадання потужностей на ділянки їх менших значень.

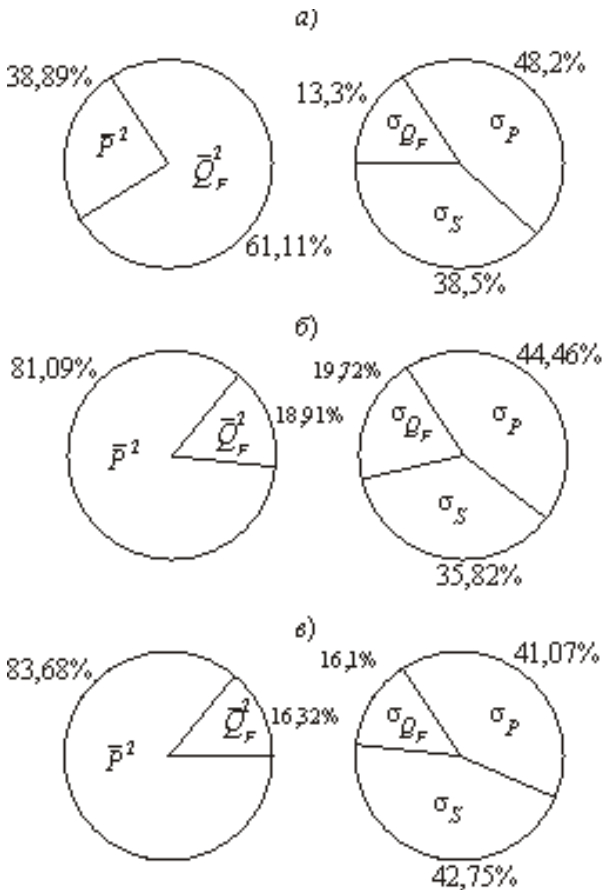


Рис. 7. Діаграми балансу «добових» (а) і «миттєвих» (б, в) значень складових фідерної потужності (квадратів математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень) на ТП А» (а, б) і на ТП В» (в)

### Висновки

1. Стохастичний характер часової зміни фідерних напруг і струмів обумовлює необхідність складання балансу потужностей на основі нових концепцій, однією з яких є перспективна концепція реактивної потужності по Фризе.
2. Індукційні лічильники електроенергії, що увімкнені в електричні кола фідерів, володіють значною помилкою, тому найбільш правильний шлях оцінки складових повної потужності – експериментально-розрахунковий, що базується на отриманих в реальних умовах експлуатації часових залежностях фідерних напруг і струмів.
3. Запропонований метод «дискретної електротехніки» являється найпростішим і в той же час достатньо точним способом

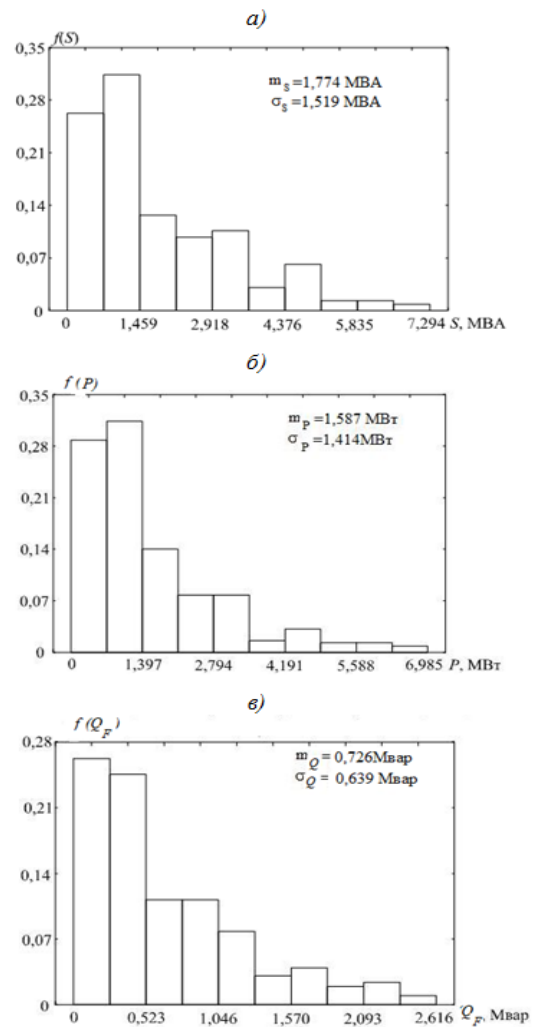


Рис. 8. Статистичні розподілення «миттєвих» значень фідерних повної S (а), активної P (б) та реактивної  $Q_F$  (в) потужностей тягової підстанції «В»

визначення повної, активної і реактивної потужностей.

4. Випадкові процеси фідерних напруг і струмів можна вважати в першому наближенні стаціонарними ергодичними процесами.

5. Складові балансу фідерних потужностей являються різкозмінними часовими залежностями, в яких середньодобові значення реактивної потужності по Фризе на протязі деяких діб перевищують активну потужність.

6. Статистичні розподілення усіх складових балансу потужностей не підкоряються закону Гаусса, однак середньоквадратичні відхилення активної потужності в 2...2,5 рази перевищують цей показник для реактивної потужності по Фризе.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баланс энергий в электрических цепях/ В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк, В. Я. Жуйков, В. Т. Стрелков, Ю. А. Яценко. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Костін, М. О. Неоднозначність визначення поняття «реактивної потужності» в колах несинусоїдних електричних величин/ М. О. Костін, О. Г. Шейкіна // Гірничі електромеханіка та автоматика, 2002, вип. 69, С. 3-8.
3. Akagi H. et al.: Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p, ISBN: 978-0-470-10761-4.
4. Czarnecki L.: On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. IEEE Trans. Power Electron, 2004, Vol. 19, Iss. 3, pp. 828–836.
5. Herrera R. et al.: Present point of view about the instantaneous reactive power theory. IET Power Electron., 2009, Vol. 2, Iss. 5, pp. 484-495.
6. Budeany C. Problem de la presence der puissance's reactive dans les installation de production et distribution d'energie // Rap. Et discuss. Ssr la puissance reactive, 1929. – Pt. 3- P. 117-218.
7. Fryses S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicghtsinsformigen Verlaf von Strom und Spannung / S. Fryse // Elektrotechn. Z. – 1932 – № 25 – S. 596-599; № 26 – S. 625-627; № 29 – S. 700-702.
8. Киселев, В. В. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии / В. В. Киселев, И. С. Пономаренко // Пром. Энергетика. – 2004. – № 2. – С. 40-45.
9. Гуртовцев, А. Л. О суммарных предельных и реальных погрешностях электронных электросчетчиков / А. Л. Гуртовцев // Электрика. – 2007. – № 7. – С.16-23.
10. Денисюк, С. П. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії / С. П. Денисюк, В. О. Кравцов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ-2008». – 2008. – Ч. 1. – С. 61-66.
11. Босий Д. О. Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних спотворень / Д. О. Босий, О. М. Синьогіна // Електрифікація транспорту, №7. – 2014. – С. 98-105.
12. Скрябинский, В. С. Особенности учета энергии на тяговых железнодорожных подстанциях / В. С. Скрябинский, Д. В. Сотников, Ю. Б. Манусов. – К. : ИЭД, 1978. – 28 с. – (Препринт – 170 ИЭД,АН УССР)
13. Петров, А. В. Непродуктивные втраты электроэнергии в системе электропостачания электрической тяги постоянного тока: дис....канд. техн. наук: 05.22.09/ Петров Андрей Владимирович; Днепропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – 226 с. – Бібліогр.: С. 195-210.
14. Костін, М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними

## REFERENCES

1. Tonkal V. E., Novoseltsev A. V., Denisiuk S. P., Zhuikov V. Ia., Strelkov V. T., Iatsenko Iu. A. *Balans energii v elektricheskikh tsepiakh* [The balance of energy in electrical circuits]. Kyiv, Nauk. dumka, 1992. 312 p.
2. Kostin M. O., Sheikina O. G. Neodnoznachnist vyznachennia poniattia «reaktyvnoi potuzhnosti» v kolakh nesynusoidnykh elektrychnykh velychyn [The ambiguity of the definition of "reactive power" in the chain of non-sinusoidal electrical quantities ]. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical and Automation], 2002, issue 69, pp. 3-8.
3. Akagi H. et al.: Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p, ISBN: 978-0-470-10761-4.
4. Czarnecki L.: On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. IEEE Trans. Power Electron, 2004, vol. 19, iss. 3, pp. 828–836.
5. Herrera R. et al.: Present point of view about the instantaneous reactive power theory. IET Power Electron., 2009, vol. 2, iss. 5, pp. 484-495.
6. Budeany C. Problem de la presence der puissance's reactive dans les installation de production et distribution d'energie // Rap. Et discuss. Ssr la puissance reactive, 1929. Pt. 3, pp. 117-218.
7. Fryses S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicghtsinsformigen Verlaf von Strom und Spannung / S. Fryse // Elektrotechn. Z. – 1932 – № 25 – S. 596-599; № 26 – S. 625-627; № 29 – S. 700-702.
8. Kiselev V. V., Ponomarenko I. S. Vliianie nesinusoidalnosti napriazheniia i toka na pokazaniia elektronnykh schetchikov elektroenerгии [Influence of non-sinusoidal voltage and current readings of electronic meters of electric energy ]. *Prom. Energetika* [Prom. Energetics.], 2004, no. 2, pp. 40-45.
9. Gurtovtsev A. L. O summarnykh predelnykh i realnykh pogreshnostiakh elektronnykh elektroschetchikov [On the aggregate limit and the actual errors of electronic meters]. *Elektrika* [Electrics], 2007, no. 7, pp. 16-23.
10. Denisiuk S. P., Kravtsov V. O. Otsinka tochnosti vimiriuvannia skladovykh elektroenerгии v sistemakh z peretvoriuvachami elektroenerгии [Evaluation of the accuracy of measurement of electric energy components in the inverter power systems ]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics], 2008, Ch. 1, pp. 61-66.
11. Bosii D. O., Sinogina O. M. Oblik elektroenerгии suchasnymy elektronnyy lychilnykamy v umovakh harmoniinykh spotvoren [Metering modern electronic counters in terms of harmonic distortion]. *Elektryfikatsiia transportu* [Electrification of transport], 2014, no. 7, pp. 98-105.
12. Skriabinskii V. S., Sotnikov D. V., Manusov Iu. B. Osobennosti ucheta energii na tiagovykh zheleznodorozhnykh podstantsiiah [Features energy metering rail traction substations] . K. : IED, 1978, 28 p. – (Preprint – 170 IED,AN USSR).
13. Petrov A. V. *Neproduktivni vtraty elektroenerгии v systemi elektropostachannia elektrychnoi tiagi postiinogo strumu* Kand, Diss. [Unproductive losses of

електроенергетичними процесами / М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Тем. вип. ПСЕ-2006. Част. 6. Київ, 2006 – С. 3-8.

15. Костин, Н. А. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. Вип. 2, 2010. – С. 14-17.

16. Нікітенко, А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричного транспорту / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Наука та прогрес транспорту. – Дніпропетровськ, 2014. Вип. 3 (51). – С. 51-64.

17. Костин, Н. А. Реактивная мощность в системах электрического транспорта постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2005. – Вып.15. – С. 75-80.

18. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.

19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей [для студ. вузов] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1965. – 576 с.

20. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 463 с.

Надійшла до друку 15.11.2016.

electricity in sistete power electric traction DC. Kand, Diss]. Dnipropetrovsk, 2011.

14. Kostin M. O. Metody vyznachennia potuzhnosti v sistemakh zi stokhastychnymi elektroenergetychnymy protsesamy [Methods for determining the capacity in electric power systems with stochastic processes]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamic]. Tem. vip. PSE-2006. Chast. 6. Kyiv, 2006, pp. 3-8.

15. Kostin N. A. Metody opredeleniia sostavliaiushchikh polnoi moshchnosti v sistemakh elektricheskoi tiagi [Methods of determining the components of the total power in the electric traction systems]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamic], 2010, issue 2, pp. 14-17.

16. Nikitenko A. V., Kostin M. O. Koreliatsiino-dispersiini metod vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v prystroiakh elektrychnoho transportu [The correlation AV-variance method of determining the components of the total power in the electric transportation devices]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. Nauka ta progres transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Science and Progress transport], 2014, issue 3 (51), pp. 51-64.

17. Kostin N. A., Sablin O. I. Reaktivnaia moshchnost' v sistemakh elektricheskogo transporta postoiannogo toka [Reactive power systems in electric vehicles DC]. *Visnyk priazovskoho derzhavnoho tehnicnoho universytetu* [Bulletin of Azov State Technical University], 2005, issue 15, pp. 75-80.

18. Gonorovskii I. S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio Circuits and Signals]. Moskva, Sov. radio, 1977. 608 p.

19. Venttsel' E. S. *Teoriia veroiatnostoni* [Probability theory]. Moskva, Nauka, 1965. 576 p.

20. Sveshnikov A. A. *Prikladnye metody teorii sluchainykh funktsii* [Applied methods of the theory of random functions]. Moskva, Nauka, 1968. 463 p.

Внутрішній рецензент *Муха А.М.*

Зовнішній рецензент *Шкрабець Ф. П.*

Запропоновано і теоретично обґрунтовано метод складання та виконано чисельні розрахунки складових балансу фідерних потужностей на основі нової концепції, концепції реактивної потужності по Фризе. Використано методики і прилади часової реєстрації фідерних напруг і струмів на діючих тягових підстанціях, методи «дискретної електротехніки», теорії випадкових процесів та способи імовірнісно-статистичної обробки осцилограм і реєстрограм. Виконано чисельну оцінку складових балансу фідерних потужностей. Показано, що середньодобові значення реактивної потужності по Фризе на протязі ряду діб роботи фідера перевищують активну потужність, а дисперсія останньої у 2...2,5 рази перевищує цей показник для реактивної потужності. Доведено, що у першому наближенні стохастичні процеси фідерних напруг і струмів являються стаціонарними ергодичними процесами. Запропоновано нову концепцію електроенергетичного балансу фідерних електричних кіл тягових підстанцій постійного струму на основі реактивної потужності по Фризе. Знайшов подальший розвиток метод «дискретної електротехніки» визначення складових балансу потужностей фідерних кіл зі стохастичними напругами і струмами. Встановлено закономірності часової зміни повної, активної та реактивної потужностей. Отримані аналітичні співвідношення складових повної потужності дають можливість виконувати електроенергетичний аналіз-баланс як фідерів, так і всієї тягової підстанції з урахуванням випадкових технологічних змін фідерних і підстанційних напруг і струмів. Чисельно-графічні залежності складових фідерних потужностей рекомендується для прогнозування і оцінки електроенергетичної ефективності роботи тягових підстанцій з наступною розробкою алгоритмів керування потоком електроенергії від тягової підстанції до електроурухомого складу.

**Ключові слова:** потужність; фідер; випадковий процес; струм; баланс; Фризе; напруга; тягова підстанція; дискретна електротехніка.



УДК 621.331:621.311

Н.А. КОСТИН (ДНУЖТ), О.Г. ШЕЙКИНА (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 3731537, эл. почта: [nkostin@ukr.net](mailto:nkostin@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/000-0002-0856-6397](http://orcid.org/000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674)

## БАЛАНС ПО КОНЦЕПЦИИ ФРИЗЕ ФИДЕРНЫХ МОЩНОСТЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предложен и теоретически обоснован метод составления и выполнены численные расчеты составляющих баланса фидерных мощностей на основе новой концепции, концепции реактивной мощности по Фризе. Используются методики и приборы временной регистрации фидерных напряжений и токов на действующих тяговых подстанциях, методы «дискретной электротехники», теории случайных процессов и способы вероятностно-статистической обработки осциллограмм и регистрограмм. Выполнена численная оценка составляющих баланса фидерных мощностей. Показано, что среднеквадратические значения реактивной мощности по Фризе на протяжении ряда суток работы фидера превышают активную мощность, а дисперсия последней в 2...2,5 раза превышает этот показатель для реактивной мощности. Доказано, что в первом приближении стохастические процессы фидерных напряжений и токов являются эргодическими процессами. Предложена новая концепция электроэнергетического баланса фидерных электрических цепей тяговых подстанций постоянного тока на основе реактивной мощности по Фризе. Нашел дальнейшее развитие метод «дискретной электротехники» определения составляющих баланса мощностей фидерных цепей со стохастическими напряжениями и токами. Установлены закономерности временного изменения полной, активной и реактивной мощностей. Полученные аналитические соотношения составляющих полной мощности дают возможность выполнить электроэнергетический анализ-баланс как фидеров, так и всей тяговой подстанции с учетом случайных технологических изменений фидерных и подстанционных напряжений и токов. Численно-графические зависимости составляющих фидерных мощностей рекомендуются для прогнозирования и оценки электроэнергетической эффективности работы тяговых подстанций с последующей разработкой алгоритмов управления потоком электроэнергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу.

**Ключевые слова:** фидер; случайный процесс; ток; баланс; Фризе; напряжение; тяговая подстанция; дискретная электротехника.

Внутренний рецензент *Муха А.М.*

Внешний рецензент *Шкрабец Ф. П.*

UDC 621.331:621.311

M.O. KOSTIN (DNURT), O.G. SHEYKINA (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, st. Lazaryan, 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 3731537, e-mail: [nkostin@ukr.net](mailto:nkostin@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/000-0002-0856-6397](http://orcid.org/000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674)

## BALANCE OF FEEDER POWERS OF DC TRACTION SUBSTATIONS BASED ON FRYZE'S CONCEPTION

The main aim of the paper is theoretical definition of the method and numerical calculation of the components of power balance in the feeders using the new conception based on Fryze's power theory. The methodology uses the approaches of the "discrete electrical engineering", theory of random processes and the time records of voltage and current in feeder lines of the DC traction substation. In addition, the probabilistic-spectral method is applied for the recorded data processing. The estimation of components of balance of feeder powers is performed using proposed method. It is show, that the average daily values of Fryze's reactive power exceed the values of active power over a whole number of days. Therefore, the variance of reactive power exceeds its rate for the active power in 2...2,5 times. It was proved, that the stochastic voltages and currents are the stationary ergodic processes in the first approximation. The novelty consists in the new conception of electric power balance for feeder electric circuits of the DC traction substations using Fryze's conception. The method of "discrete electrical engineering" for estimation the components of power balance of feeder circuits with stochastic voltages and currents is investigated. The laws of time variations are determined for the total, active and reactive powers. The obtained analytical expressions of the total power components allow to perform the analysis of electric power balance for feeder lines and, in addition, for all traction substation taking into account the random technological changes of voltages and currents in the feeder lines and substation. It is recommended to predict and estimate the effectiveness of the traction substation operation using the numerical and graphical dependences of the components of feeder powers with the next developing of control algorithms for the energy flow from traction substation to electric rolling stock.

**Keywords:** power; feeder line; stochastic process; current; balance; Fryze; voltage; traction substation; discrete electrical engineering.

Internal reviewer *Mukha A.M.*

External reviewer *Shkrabets F.P.*

© Костін М. О., Шейкіна О. Г., 2016