

УДК 621.317.78

### ОЦІНКА СТАТИСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РЕЖИМУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СПОЖИВАННЯ ЦЕНТРА ЖИВЛЕННЯ КАР'ЄРУ

**Є. П. Карлик, О. В. Бялобржеський**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zhenya021986@i.ua

Надано основні результати аналізу добових графіків навантаження, що були зафіксовані на шинах низької напруги головної понижувальної підстанції кар'єру. Наведено діаграму процентного співвідношення потужностей основного електротехнічного обладнання кар'єру та описано особливості його роботи. Доведено необхідність застосування методів математичної статистики для оцінки та визначення групового навантаження. Приведено алгоритм прогнозування групового навантаження, який базується на нормальному розподілі індивідуальних графіків навантаження електротехнологічного обладнання. Алгоритм прогнозування глобально складається з двох частин. У першій частині індивідуальні графіки навантаження досліджуваного обладнання перевіряються на розподіл за нормальним законом. У другій – розраховуються статистичні характеристики та довірчі інтервали індивідуальних навантажень, визначається сумарне навантаження групи електроприймачів ділянки кар'єру. Побудований алгоритм прогнозування групового навантаження дозволяє уточнити групове навантаження, враховуючи при цьому схеми підключення основного обладнання.

**Ключові слова:** система електропостачання, електричні навантаження, електротехнічні установки, графіки навантаження.

### ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЖИМОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЦЕНТРА ПИТАНИЯ КАРЬЕРА

**Е. П. Карлик, А. В. Бялобржеский.**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zhenya021986@i.ua

Представлены основные результаты анализа суточных графиков нагрузки, которые были зафиксированы на шинах низкого напряжения главной понижающей подстанции карьера. Приведена диаграмма процентного соотношения мощностей основного электротехнического оборудования карьера и описаны особенности его работы. Доказана необходимость применения методов математической статистики для оценки и определения групповой нагрузки. Приведен алгоритм прогнозирования групповой нагрузки, основанный на нормальном распределении индивидуальных графиков нагрузки электротехнологического оборудования. Алгоритм прогнозирования глобально состоит из двух частей. В первой части индивидуальные графики нагрузки исследуемого оборудования проверяются на распределение по нормальному закону. Во второй – рассчитываются статистические характеристики и доверительные интервалы индивидуальных нагрузок, определяется суммарная нагрузка группы электроприемников участка карьера. Представленный алгоритм прогнозирования групповой нагрузки позволяет уточнить суммарные нагрузки, учитывая при этом схемы подключения основного электротехнического оборудования.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, электрические нагрузки, электротехнологические установки, графики нагрузки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Вирішення енергетичних задач експлуатації систем електропостачання (СЕ) неможливе без правильної оцінки електричних навантажень (ЕН). Необґрунтоване зменшення розрахункового значення ЕН може призвести до підвищення витрат електричної енергії, прискорює зношування електроустаткування, обмежує продуктивність окремих агрегатів і усього підприємства [1]. Завищення розрахункових навантажень веде за собою збільшення капітальних витрат і неповне використання дефіцитного електроустаткування й провідникового матеріалу [2].

Визначення розрахункового навантаження методами, що застосовують коефіцієнти використання та максимуму активної та реактивної потужності чи струму, призводять до суттєвого завищення електричних навантажень, що неодноразово доводилось зустрічати на практиці. Альтернативою чи, так би мовити, перехідним етапом до створення нового методу може послужити статистичний метод оцінки режимів навантаження [1, 4–7].

Таким чином, метою роботи є задача визначення електричного навантаження групи електроприймачів, яка підключена до головної понижувальної підстанції з урахуванням нормального закону розподілення електричного навантаження та схем підключення електротехнологічного обладнання.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** СЕ кар'єру поєднує велику кількість різних електротехнічних установок (ЕУ) (рис. 1). Умови роботи великої сукупності технічних пристроїв різко відрізняються одне від одного й носять, з точки зору енергетичної системи, випадковий характер. Групові графіки навантаження  $P(t)$  ЕУ є чергуванням багатоступінчатих імпульсів (рис. 2). Це пояснюється випадковими моментами вмикання окремих ЕУ, неодноразовими вмиканнями й паузами. Одноступінчатий імпульс у груповому графіку – це імпульс одної ЕУ. Багатоступінчатий імпульс утворюється при накладанні декількох індивідуальних імпульсів (співпадіння роботи декількох ЕУ) [2, 3]. Для центру жив-

лення кар'єру картина споживання електричної енергії ще складніша. Кожна ЕУ має свій цикл роботи, який повторюється періодично, але з варіаціями, обумовленими керуванням оператора.

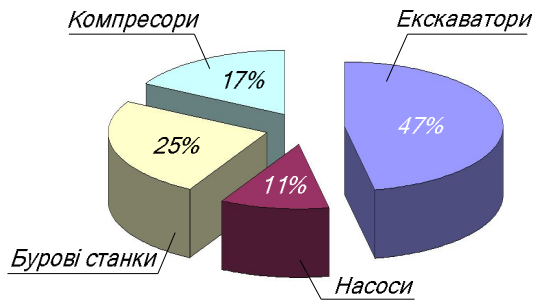


Рисунок 1 – Процентне співвідношення потужностей основного електротехнічного обладнання Дніпровського кар'єру на 2012 рік

Це додає певного невизначення у роботу головної понижувальної підстанції, (як складової енерго-

системи), що разом зі специфікою роботи електротехнічного обладнання ускладнює прогнозування графіка навантаження. Заздалегідь передбачити очікувану величину навантаження головної понижувальної підстанції у будь-який момент часу можна лише з деякою ймовірністю.

На рис. 3, 4 зображено алгоритм прогнозування електричного навантаження групи електроспоживачів різних типів, працюючих у нерегулярному режимі, що зумовлено особливостями технологічного процесу. Глобально алгоритм складається з двох частин. У першій частині (рис. 3) висувається гіпотеза, що індивідуальні графіки навантаження групи електроспоживачів розподілені за нормальним законом. Потім, спираючись на те, що величина індивідуального навантаження в кожному технологічному режимі, а також тривалість цих режимів підкоряються нормальному закону розподілення, визначають розрахункові характеристики індивідуальних навантажень і тривалостей технологічних режимів, сумують індивідуальні навантаження й визначають шукану величину групового навантаження (рис. 4).

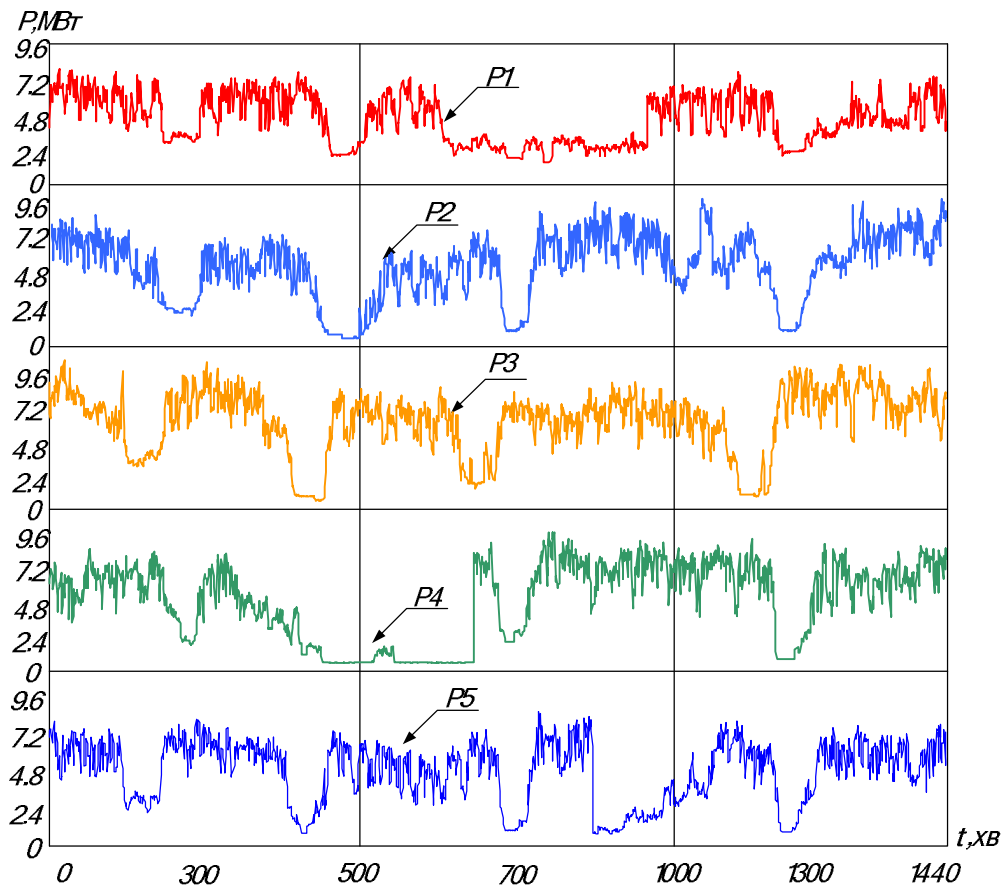


Рисунок 2 – Реалізація випадкового процесу  $P(t)$  – добові графіки навантаження за п'ять днів, які були зафіксовані на шинах низької напруги головної понижувальної підстанції 4/1 вимірювальним блоком Енергомонітор 3.3Т

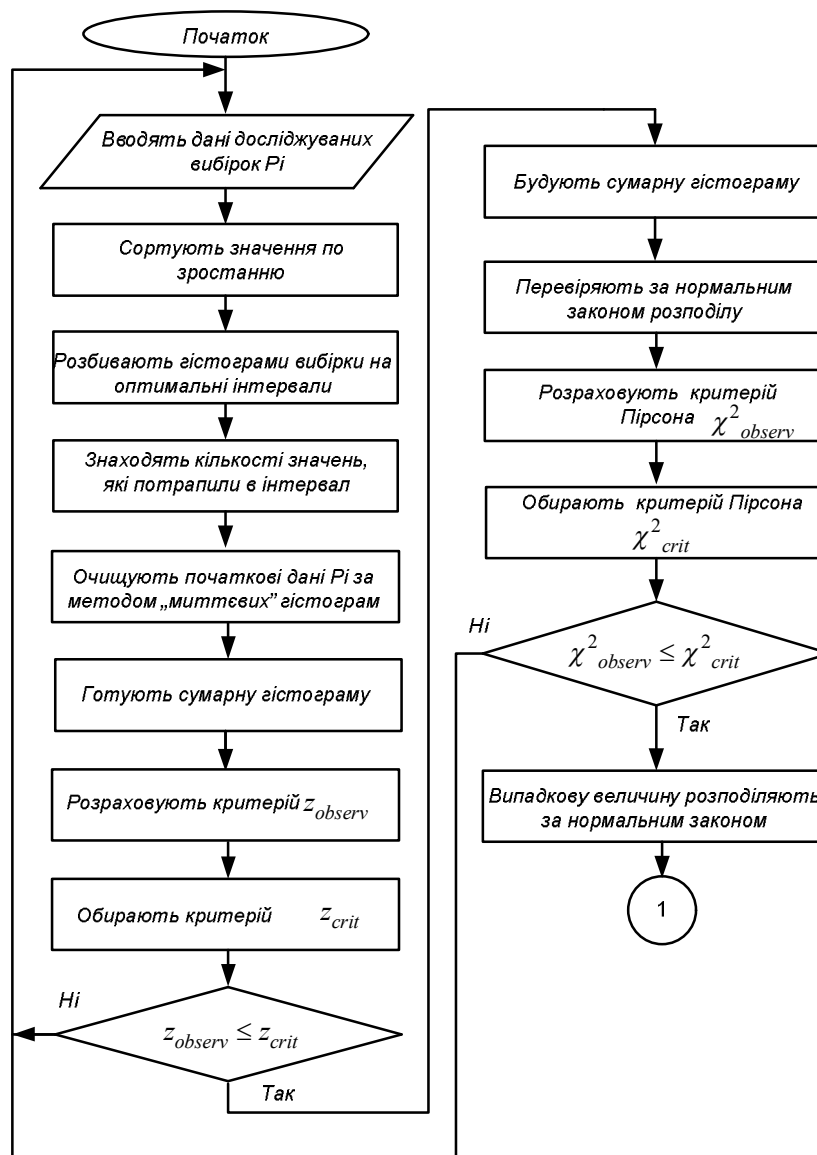


Рисунок 3 – Алгоритм прогнозування електричного навантаження групи електроприймачів, частина перша

Алгоритм прогнозування електричного навантаження групи електроприймачів, що живиться від головної понижувальної підстанції, реалізується наступним чином.

Проводять вимірювання електричних навантажень  $P_i$  за досліджуваний період часу, дані формують у масив і вводять в електронно-обчислювальну машину (ЕОМ), за відповідними методами проводять сортування даних за зростанням, дані вибірки  $P_i, P_{i+1}, P_{i+2} \dots$  розбивають на оптимальну кількість інтервалів за наступним виразом:

$$h = \frac{P_{(i)\max} - P_{(i)\min}}{1 + 3,2 \ln(n)}, \quad (1)$$

де  $P_{(i)\max}, P_{(i)\min}$  – максимальні й мінімальні значення активної потужності періоду часу;  $n$  – кількість вимірів активної потужності.

Знаходять значення вибірок за допомогою правила трьох сигм. Визначають частоту розподілу величини навантаження  $p_i^*$ :

$$p_i^* = \frac{n_i}{n}, \quad (2)$$

де  $n_i$  – число разів, коли  $P$  прийняла значення  $P_i$ ;  $n$  – об'єм вибірок навантаження.

Визначають математичне очікування:

$$M(P_i) = \sum_{i=1}^n P_i - p_i^*. \quad (3)$$

Визначають дисперсію:

$$D(P_i) = \sum_{i=1}^n (P_i - M(P_i))^2 p_i^*. \quad (4)$$

Визначають середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(P_i) = \sqrt{D(P_i)}. \quad (5)$$

Визначають інтервали розкиду навантаження за правилом трьох сигм ( $\sigma$ ):

$$\begin{aligned} M(P_i) - 3\sigma(P_i); \\ M(P_i) + 3\sigma(P_i). \end{aligned} \quad (6)$$

Виконують очистку початкових даних  $P_i$  за методом «миттєвих» гістограм.

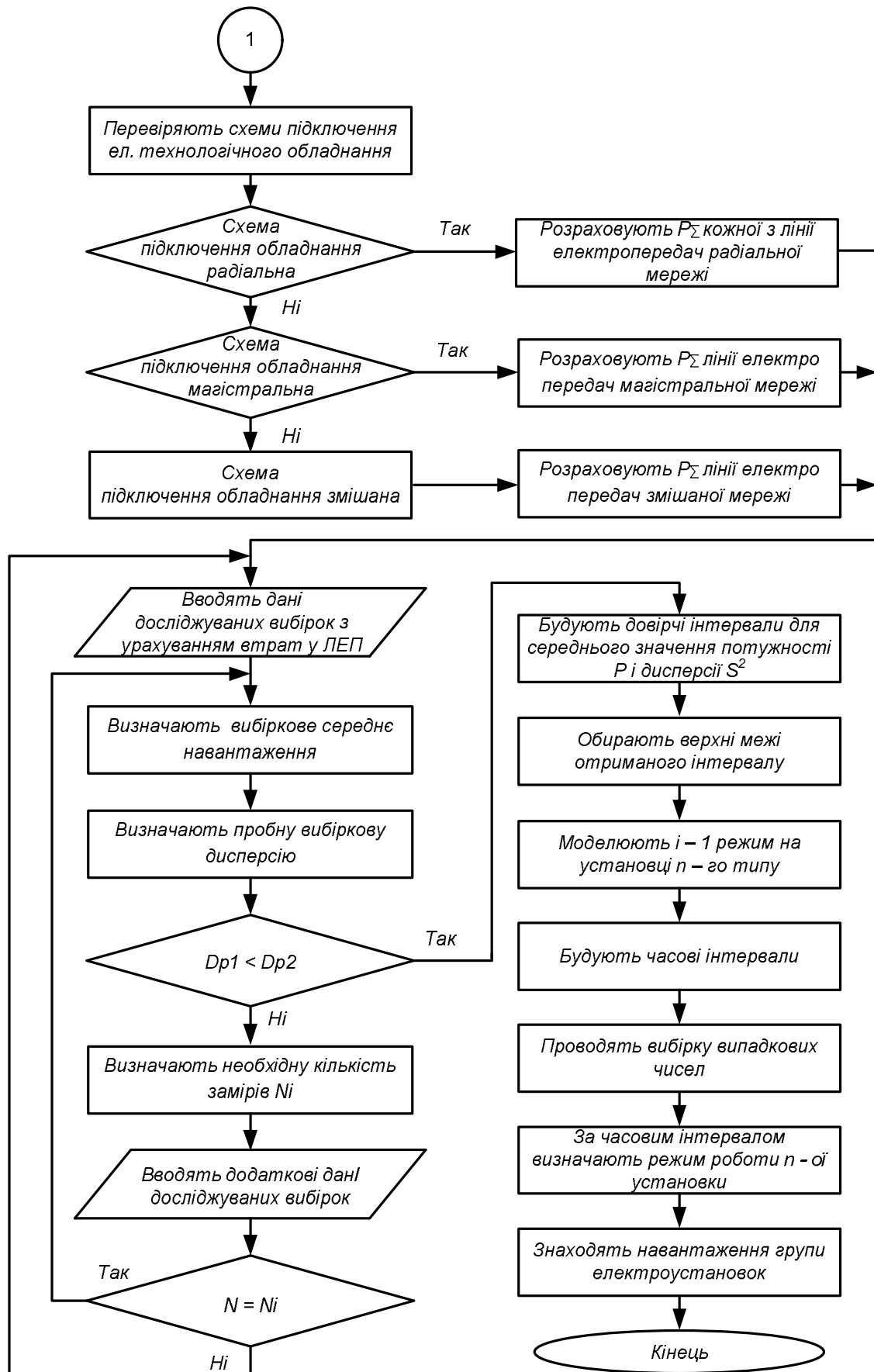


Рисунок 4 – Алгоритм прогнозування електричного навантаження групи електроприймачів, частина друга

Проводять підготовку для побудови сумарної гістограми.

1. Визначають спостережуваний критерій:

$$z_{observ} = \frac{|M(P_i) - M(P_{i+1})|}{\sqrt{\frac{D(P_i)}{n_i} + \frac{D(P_{i+1})}{n_{i+1}}}}, \quad (7)$$

де  $M(P_i)$  і  $M(P_{i+1})$  – центри розподілу (середні значення) вибірок;  $D(P_i)$  і  $D(P_{i+1})$  – оцінки дисперсії;  $n, n+1$  – кількість вимірів активної потужності  $i$  та  $i+1$  вибірок.

2. Критичне значення критерію  $z_{krit}$  розраховують за допомогою функції Лапласа:

$$f_0(z_{crit}) = \frac{1 - \alpha}{2}, \quad (8)$$

де  $\alpha$  – рівень значимості, що обирають з таблиць.

За знайденими значеннями функції Лапласа з таблиць обирають  $z_{crit}$ .

Отримані дані перевіряють нерівністю  $z_{observ} \leq z_{crit}$ .

Якщо нерівність не виконана, то вибірки  $P_i, P_{i+1}$  двох центрів розподілу відкидають і виконують повторне введення початкових даних.

Якщо нерівність виконана, то за існуючими методами будують сумарну гістограму, повторно розраховують оптимальну кількість інтервалів (1) уже сумарної гістограми.

Проводять перевірку сумарної гістограми за нормальним законом розподілення.

Значення нормального розподілення випадкової величини визначають за виразом:

$$f(P_i) = \frac{1}{\sigma(P_i)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_i - M(P_i))^2}{2\sigma^2(P_i)}}, \quad (9)$$

де  $M(P_i)$  – математичне очікування потужності навантаження (3);  $\sigma(P_i)$  – середньоквадратичне відхилення потужності навантаження (5).

Розраховують щільність розподілу частот:

$$f^*(P_i) = \frac{P_i^*}{h}, \quad (10)$$

де  $h$  – довжина розряду;  $P_i^*$  – частота розподілу величини навантаження.

Визначають імовірність потрапляння значень активної потужності в заданий інтервал:

$$p_i(P_i) = f(P_i)h. \quad (11)$$

Перевіряють справедливість сумарної гістограми розподілу навантаження за допомогою критерію Пірсона:

$$\chi_{spost}^2 = n \sum_{i=1}^r \frac{(P_i - P_i^*)^2}{P_i}, \quad (12)$$

де  $n$  – об'єм вибірки;  $P_i$  – імовірність потрапляння значень активної потужності в заданий інтервал;  $P_i^*$  – частота розподілу потужності. Визначають число ступенів свободи:

$$k = r - v - 1, \quad (13)$$

де  $r$  – число розрядів;  $v$  – число параметрів розподілу, що перевіряється.

Визначивши число ступенів свободи, обирають коефіцієнт значущості  $\alpha$  (0,001; 0,01; 0,05; 0,1).

На основі коефіцієнта значущості з таблиць обирають  $\chi_{crit}^2$  для перевірки нерівності  $\chi_{observ}^2 < \chi_{crit}^2$ .

Якщо нерівність не виконується, то досліджувана величина навантаження розподілена не за нормальним законом розподілу. Якщо нерівність виконана – випадкова величина розподілена за нормальним законом розподілення (рис. 3).

Перевіряють схеми підключення електротехнологічного обладнання та визначають втрати потужності у лініях електропередач  $\Delta P_L$  (рис. 5).

Порядок розрахунку схем підключення електротехнологічного обладнання обирають, виходячи зі спеціалізації підприємства та схеми підключення навантаження.

Якщо схема підключення електротехнологічного обладнання радіальна (рис. 5,а) то сумарну потужність розраховують за виразом

$$P_{\Sigma} = P_1' + P_2' + P_3' = \left( P_1 + \frac{R_{0-1}}{U_{nom}^2} P_1^2 \right) + \left( P_2 + \frac{R_{0-2}}{U_{nom}^2} P_2^2 \right) + \left( P_3 + \frac{R_{0-3}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right), \quad (14)$$

де  $P_1', P_2', P_3'$  – значення потужності, розраховані з урахуванням втрат у лінії;  $R_{0-1}, R_{0-2}, R_{0-3}$  – опори кожної лінії електропередач;  $P_1, P_2, P_3$  – потужності навантаження;  $U_{nom}^2$  – номінальна напруга мережі.

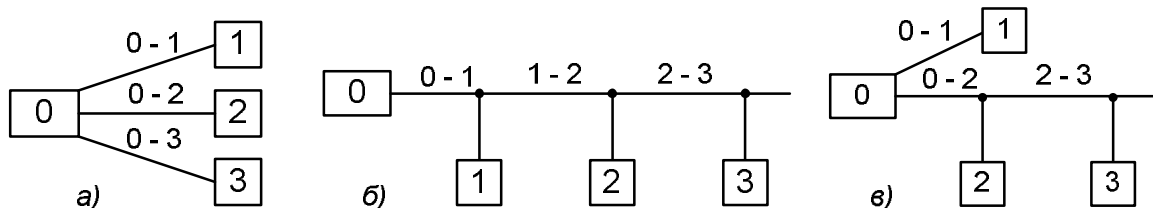


Рисунок 5 – Схеми підключення електротехнологічного обладнання: а) радіальна; б) магістральна; в) змішана

Якщо схема підключення магістральна (рис. 5,б), сумарну споживану потужність розраховують за виразом

$$P_{\Sigma} = \left( P_3 + \frac{R_{23}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right) + \left( P_2 + \frac{R_{12}}{U_{nom}^2} \left( P_2 + P_3 + \frac{R_{23}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right)^2 \right) + P_1 + \frac{R_{01}}{U_{nom}^2} \left( P_1 + P_2 + \frac{R_{12}}{U_{nom}^2} \left( P_2 + P_3 + \frac{R_{23}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right)^2 \right). \quad (15)$$

Якщо схема підключення обладнання змішана (рис. 5,в), сумарну споживану потужність розраховують за виразом

$$P_{\Sigma} = \left( P_1 + \frac{R_{01}}{U_{nom}^2} P_1^2 \right) + \left( P_3 + \frac{R_{23}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right) + \left( P_2 + \frac{R_{02}}{U_{nom}^2} \left( P_2 + P_3 + \frac{R_{23}}{U_{nom}^2} P_3^2 \right)^2 \right). \quad (16)$$

Після вибору схеми підключення й розрахунку втрат потужності у ЛЕП проводять уведення досліджуваних вибірок  $P'_n$ .

Визначають пробне вибіркове середнє значення електричного навантаження режиму:

$$\bar{P} = \frac{1}{3} (P'_1 + P'_2 + P'_3), \quad (17)$$

де  $P'_1, P'_2, P'_3$  – значення потужності навантажень 1, 2, 3 (рис. 4), виміряні за певний інтервал часу з урахуванням втрат у лінії.

Визначають пробну вибіркочну дисперсію:

$$D^2 = \frac{1}{2} \left[ (P'_1 - \bar{P})^2 + (P'_2 - \bar{P})^2 + (P'_3 - \bar{P})^2 \right]. \quad (18)$$

Проводять побудову довірчого інтервалу з рівнем довіри  $\gamma 90\%$  і довжиною  $z\Delta = 0,1\bar{P}$ ,  $\Delta = 0,05\bar{P}$ . Знаходять необхідну кількість замірів:

$$N = t_{0,1}^2 \frac{D^2}{\Delta^2}, \quad (19)$$

де  $t_{0,1} = 2,92$  – квантиль розподілу Стюдента, що відповідає двом ступеням свободи й заданому рівню довіри (0,11–0,9).

Проводять додаткові розрахунки й повторно розраховують середнє значення навантаження (17), пробну вибіркочну дисперсію (18).

Будують довірчі інтервали для середнього значення потужності  $\bar{P}$  та дисперсії  $D^2$ , параметрів нормального розподілу навантаження технологічних режимів споживачів.

Довірчі інтервали для середнього значення потужності навантаження  $\bar{P}$ :

$$\left[ \bar{P} - \frac{D^2 t_{N-1;0,05}}{\sqrt{N}}; \bar{P} + \frac{D^2 t_{N-1;0,05}}{\sqrt{N}} \right], \quad (20)$$

де  $t_{N-1;0,05}$  обирають із таблиці Стюдента.

Знаходять довірчий інтервал для дисперсії навантаження за відповідними статистичними виразами:

$$\left[ \frac{(N-1)D^2}{\chi_{N-1;0,05}^2}; \frac{(N-1)D^2}{\chi_{N-1;0,95}^2} \right], \quad (20)$$

де  $\chi_{N-1;0,05}^2$  і  $\chi_{N-1;0,95}^2$  вибираються з таблиці  $\chi^2$  розподілу.

Обирають верхні межі цих інтервалів як розрахункові величини для певного технологічного режиму й обраного типу електроспоживачів.

Аналогічним способом визначають характеристики в усіх режимах роботи.

Тривалість роботи електротехнологічного обладнання вимірюють протягом доби. Середні величини й довірчі інтервали тривалості протікання технологічного процесу визначають аналогічним методом, що й потужність навантаження.

Результати обчислень для кожного типу обладнання наводять у вигляді чотирьох векторів:

$P^{(n)} = (P_1^{(n)}, \dots, P_{k(n)}^{(n)})$  – вектор електричного навантаження;

$D^{(n)} = (D_1^{(n)}, \dots, D_{k(n)}^{(n)})$  – вектор дисперсії електричного навантаження;

$T^{(n)} = (t_1^{(n)}, \dots, t_{k(n)}^{(n)})$  – вектор тривалості протікання процесу;

$\tau^{(n)} = (\tau_1^{(n)}, \dots, \tau_{k(n)}^{(n)})$  – вектор дисперсії тривалості протікання технологічних процесів.

На основі отриманих параметрів моделюють  $i$ -1 режим на установці певного типу:

$$\bar{k}_i^{(n)} = D_i^{(n)} x_0 + P_i^{(n)}, \quad (21)$$

де  $x_0$  – стандартний нормальний розподіл.

Проводять такі ж побудови для тривалості технологічних режимів обладнання:

$$\bar{t}_i^{(n)} = \frac{t_i^{(n)}}{24}. \quad (22)$$

Для кожної установки розбивають відрізок  $[0;1]$  на інтервали, що не перетинаються:

$$[0; \bar{t}_1^{(n)}), [\bar{t}_1^{(n)}; \bar{t}_1^{(n)} + \bar{t}_2^{(n)}), \dots, [\bar{t}_1^{(n)} + \dots + \bar{t}_{k(n)-1}^{(n)}, \bar{t}_1^{(n)}). \quad (23)$$

Проводять вибірку  $\bar{N}$  випадкових чисел так, що потрапляння  $n$ -го числа вибірки в один з інтервалів визначає режим роботи  $n$ -ої установки.

Визначають величину електричного навантаження групи електроспоживачів:

$$P_{(n)} = P_{in(n)}^{(n)} + \dots + P_{i\bar{N}(n)}^{(\bar{N})}. \quad (24)$$

За необхідності експеримент можна повторити  $n$ -ну кількість разів.

**ВИСНОВКИ.** У результаті виконання вказаного алгоритму в запропонованій послідовності здійснюється облік змін індивідуальних навантажень електроспоживачів різних типів у кожному технологічному режимі з урахуванням схеми електропостачання й підвищення тим самим точності визначення групових навантажень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
2. Карлик Є.П., Горденко А.В, Дуганець В. Аналіз енергетичних параметрів системи енергопостачання головної понижувальної підстанції 4/1 Полтавського ГЗК // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – Харків: Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – С. 68–73.
3. Зайцев Е.П. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с индивидуальными заданиями и решениями типовых вариантов:

Учебно-методическое пособие. – Кременчуг: 2008. – 484 с.

4. Лежнюк П.Д., Шулле Ю.А. Визначення і прогнозування екстремальних навантажень електротехнічних комплексів в умовах ризику та невизначеності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 107–110.
5. Мірошник О.О. Статичне дослідження основних параметрів сільських мереж 0,38/0,22 кВ // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та Енергетика АПК». – 2011. – Вип. 166 (4). – 120 с.
6. Seppala A. Load research and load estimation in electricity distribution. – Espoo: Technical Reserch Centre of Finland, 1996. – 118 p.

### STATISTICAL ESTIMATION OF MODE ENERGY CONSUMPTION THE POWERING CENTER OPENCAST MINE

**Ye. Karlyk, O. Byalobrzheskyi**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: zhenya021986@i.ua

In article presented basic results of analysis the load-graphs of main transformer substation. Displayed the diagram of basic electrical engineering equipment which works in the opencast mine. Showed that electro-technological equipment were working in random modes. The necessity of application the methods of mathematical statistics is for an estimation and determination the group loading. Showed algorithm of prognostication of the group loading, which based on normal distribution of the individual load-graphs. The algorithm consist of two global parts. The first part includes verification individual load electro-technological equipment for normal distribution. After verification simulating technological modes of equipment, than calculate standard dispersion, mathematical expectation and confidence limits. It is the second part of the algorithm. At the end of the article present conclusions. Developed algorithm prognostication of the group loading allows you to specify a group load, taking into account the connection diagram of the main equipment.

**Key words:** power-supply system, electrical load, electrotechnical equipment, the load schedules.

## REFERENCES

1. Kudrin, B. (2006), *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy* [Electricity supply industry], Engineering, Moscow, Russia. (in Russian)
2. Karlyk, Ye.P., Hordenko A.V, and Duhanets, V. (2012), “Analysis of the parameters electricity power-supply system of main transformer substation Poltava MPP”, *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist»*, Kharkiv, Ukraine. (in Ukrainian)
3. Zaytsev, Ye. (2008), *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics], Kremenchuk, Ukraine. (in Russian)
4. Lezhniuk, P.D. and Shullie, Iu.A. (2011), “Determination and prediction of extreme loads of electrical systems in terms of risk and uncertainty”, *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 4, pp. 107–110. (in Ukrainian)
5. Miroshnyk, O. (2011), “Static study of the basic parameters of village networks”, *Naukovyy visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya «Tekhnika ta Enerhetyka APK»*, Vol. 166, no. 4. (in Ukrainian)
6. Seppala, A. (1996), “Load research and load estimation in electricity distribution”, *Espoo: Technical Reserch Centre of Finland*.

Стаття надійшла 20.04.2013.