

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах
залізничних шахт**

Виконав: студент групи ЗЕЕМ-23ск

Артем РОВКОВ

Керівник випускної роботи _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

РОВКОВ Артем Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих
мережах залізорудних шахт

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є оцінювання показників
якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Теоретичні засади оцінювання показників якості електроенергії у
розподільчих мережах залізорудних шахт; II. Оцінювання показників якості
електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт; III. Практична
реалізація оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих
мережах залізорудних шахт.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Добові графіки; II. Системи електропостачання типового
гірничо-металургійного підприємства; III. Гістограми напруги.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Вимірювання показників якості електроенергії	24.05.26
2	Оцінка показників якості електроенергії	29.05.26
3	Основа якісного аналізу режиму напруги	02.06.26
4	Числові характеристики відхилення напруги	11.06.26
5	Практична реалізація оцінювання показників якості електроенергії	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Артем РОВКОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт»

38 с., 20 літературних джерел

Мета роботи: Забезпечення надійної, безпечної та енергоефективної роботи електротехнічного комплексу залізорудних шахт шляхом розробки методології комплексного оцінювання показників якості електроенергії та обґрунтування технічних рішень щодо їх нормалізації в умовах специфічного підземного середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Проаналізувати чинну нормативно-правову базу та стандарти (зокрема ДСТУ EN 50160 та IEEE 519) стосовно вимог до якості електроенергії (ЯЕ) у системах промислового електропостачання.

Дослідити структуру та режими роботи основних споживачів залізорудних шахт як джерел електромагнітних завад (потужних тиристорних перетворювачів шахтних підйомних машин, частотно-регульованих приводів вентиляторів головного провітрювання та насосів водовідливу).

Розробити алгоритм та структуру системи безперервного автоматизованого моніторингу ЯЕ на межі балансової належності та на внутрішньошахтних підстанціях.

Дослідити явище резонансу на вищих гармоніках у розгалужених кабельних мережах напругою 6–10 кВ залізорудних шахт, що мають значну власну ємність.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обґрунтувати рекомендацій щодо вибору типу, параметрів та місць встановлення засобів підвищення якості електроенергії (пасивних, активних та гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв).

ЗАЛІЗОРУДНА ШАХТА, РОЗПОДІЛЬЧА МЕРЕЖА, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЬ НАПРУГИ, КОЛИВАННЯ НАПРУГИ, МОНІТОРИНГ ЯЕ, АКТИВНІ ФІЛЬТРИ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Теоретичні засади оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт	11
1.1. Вимірювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт.....	11
1.2. Оцінка показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт.....	12
Розділ 2. Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт	13
2.1. Основа якісного аналізу режиму напруги та розробки заходів щодо його покращення	13
2.2. Числові характеристики відхилення напруги у розподільчих мережах залізорудних шахт.....	17
Розділ 3. Практична реалізація оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт	20
3.1. Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт та отримання однорідної та достовірної інформації на основі аналізу годинних точних графіків навантажень участкових підземних підстанцій	20
3.2. Результати вимірювань відхилень напруги у розподільчих мережах залізорудних шахт та отримання однорідної та достовірної інформації на основі аналізу годинних точних графіків навантажень участкових підземних підстанцій	21
Висновки	36
Список використаних джерел	37

Вступ

Актуальність та інженерна проблематика

Сучасна залізорудна шахта — це надскладний високотехнологічний підземний комплекс, ефективність якого прямо залежить від стабільності електропостачання.

За останні десятиліття відбулася масштабна цифровізація та автоматизація гірничого виробництва: на зміну реостатному та контакторному управлінню прийшли потужні напівпровідникові перетворювачі частоти на базі тиристорів та IGBT-транзисторів.

Ними оснащені головні шахтні підйомні машини, що піднімають руду з глибини понад кілометр, вентиляційні системи та потужні насоси головного водовідливу.

Проте автоматизація породила серйозну інженерну проблему.

Ці перетворювачі є класичними «нелінійними споживачами».

Вони споживають струм несинусоїдальної форми, що призводить до суттєвого спотворення форми кривої напруги в усій шахтній мережі.

Як наслідок, виникають вищі гармоніки, несиметрія та коливання напруги.

Негативні наслідки низької якості електроенергії (ЯЕ) в умовах шахти є критичними:

- Перегрів та аварії обладнання: вищі гармоніки викликають додаткові втрати в сталі трансформаторів та обмотках двигунів, що призводить до їх прискореного старіння та виходу з ладу.
- Збої систем автоматики: спотворення напруги провокує хибні спрацьовування систем релейного захисту, мікропроцесорних контролерів та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

засобів безпеки, що може повністю паралізувати роботу підйому чи викликати аварійну зупинку вентилятора.

- Ризик підземних вибухів та пожеж: спотворення струмів посилює теплову деградацію ізоляції високовольтних кабельних ліній у шахтних стовбурах, підвищуючи ризик коротких замикань.

Специфічні особливості шахтних мереж

Розподільчі мережі залізорудних шахт (напругою 6–10 кВ для підземних підстанцій та 0.4–1.14 кВ для вибійного обладнання) мають унікальні особливості, які ускладнюють процеси нормалізації ЯЕ.

По-перше, вони мають величезну протяжність і складаються виключно з броньованих кабелів, які прокладені по сирих виробках.

Така мережа має дуже велику власну електричну ємність.

Коли в неї «впорскуються» вищі гармоніки від підйомних машин, виникає небезпека резонансу струмів або напруг на певних частотах.

Резонанс може збільшити амплітуду завад у кілька разів, викликаючи миттєвий пробій ізоляції навіть нового обладнання.

По-друге, навантаження шахти є різкозмінним.

Підйомна машина виконує циклічні рейси: за кілька секунд вона розганяється до максимальної швидкості (споживаючи колосальну потужність), потім іде зі сталою швидкістю, гальмує і зупиняється.

Цей цикл повторюється безперервно, викликаючи постійні «скачки» та коливання напруги в мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практична реалізація та впровадження рішень

Для оцінювання та нормалізації показників ЯЕ на залізорудних шахтах впроваджується комплексний підхід, що поєднує цифрову діагностику та силову електроніку:

- Стационарний мікропроцесорний моніторинг:

На головних знижувальних підстанціях поверхні та центральних підземних розподільчих пунктах встановлюються спеціалізовані аналізатори якості електроенергії класу А. Вони в реальному часі вимірюють понад сотню параметрів (коефіцієнти гармонік, флікер, дози міготіння напруги, несиметрію) та інтегруються в загальношахтну систему диспетчеризації. Це дозволяє точно визначити, який саме агрегат є головним «забруднювачем» мережі в конкретний момент часу.

- Впровадження Активних фільтрів живлення (APF):

На відміну від застарілих пасивних дросельно-конденсаторних контурів, які налаштовані лише на одну частоту, сучасні активні фільтри працюють як «антишумові навушники». Вони миттєво аналізують форму викривленого струму мережі і генерують у неї такий самий струм гармонік, але у протифазі, повністю анулюючи заваду.

- Динамічна компенсація реактивної потужності (STATCOM):

Для боротьби з коливаннями напруги від підйомних машин застосовуються швидкісні статичні компенсатори. Вони здатні за мікросекунди видати або спожити необхідну реактивну потужність, стабілізуючи рівень напруги під час жорсткого пуску важких локомотивів чи підйомів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне розгортання таких систем дозволяє залізорудним шахтам суттєво знизити питоме споживання енергії, повністю ліквідувати каскадні аварії автоматики та гарантувати безперебійність підняття руди на поверхню.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Теоретичні засади оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт

1.1. Вимірювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт

Відповідно до програми робіт та методики проведення досліджень, виконано вимірювання відхилень та коливань напруги в діючих шахтних розподільчих мережах.

Перед безпосереднім виробництвом необхідних вимірювань було узагальнено результати раніше виконаних досліджень показників якості електроенергії [16].

Особливу увагу приділено роботам, проведеним на споріднених підприємствах, зокрема, в електричних мережах вугільних шахт.

Узагальнюючи досвід досліджень, необхідно зазначити, що одним з основних показників, значення якого часто перевищує встановлені нормативи, є відхилення напруги.

При цьому має місце збиток при різкому зниженні техніко-економічних показників систем електропостачання.

Оцінка якості напруги виконувалась шляхом одночасної реєстрації відхилень напруги на початку розподільчих ліній на шинах центральної підземної підстанції (ЦПП) горизонту, і в кінці безпосередньо в блоках з найбільшим електроспоживанням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1				Літ.	Лист	Листів
Розробив		Ровков А.С.									
Перевірив		Сінчук О.М.								11	2
Реценз.									КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.		Сінчук О.М.									
Затвердив		Пересунько І.І.									

1.2. Оцінка показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт

Як початкові контрольні точки реєстрації напруги обрано секції шин ($U=100V$) центральної підземної підстанції шахти [13].

Найхарактернішими кінцевими пунктами для оцінки відхилень напруги встановлено ділянки з максимальним електричним навантаженням, суттєво впливаючими на режим напруги в мережі.

Крім того, вибір контрольних вимірювань здійснювався за принципом визначення відхилень напруги в найбільш віддаленій точці, з урахуванням максимальної втрати напруги, тобто на кінцях полевих виїмкових ходів.

З цією метою оцінка якості напруги проводилася шляхом підключення приладів з подальшим збором статистичної інформації в крайніх ортах-заїздах або блоках [14,16].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт

2.1. Основа якісного аналізу режиму напруги та розробки заходів щодо його покращення

Основою якісного аналізу режиму напруги та розробки заходів щодо його покращення є роздільний аналіз - побудова ряду гістограм або кривих розподілу за стабільними режимами добового циклу навантаження, а також днями тижня.

Якщо за час вимірювання T напруга в допустимому діапазоні не була у відрізку часу t_{g_1} , t_{g_2} , t_{g_3} , то частка часу, протягом якої напруга знаходилася в допустимому діапазоні

$$P = \frac{t_{g_1} + t_{g_2} + t_{g_3}}{T} \quad (2.1)$$

Величина P - інтегральна ймовірність попадання напруги в допустимий діапазон.

При зміні напруги в широких межах більш ніж заданий діапазон (δU_2 — δU_1) то ймовірність його потрапляння до цього діапазону оцінюється:
 $0 < P < 1$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2				Лім.	Лист	Листів
Розробив	Ровков А.С.										
Перевірів	Сінчук О.М.									13	7
Реценз.									КНУ ЗЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук О.М.										
Затвердив	Пересунько І.І.										

За відомою залежністю для безперервних функцій ймовірність влучення σU_i , у заданий діапазон дорівнює збільшенню функції розподілу відхилень напруги на цій ділянці:

$$P(\delta U_1 < \delta U < \delta U_2) = F(\delta U_2) - F(\delta U_1). \quad (2.2)$$

При охопленні в процесі вимірювання всього діапазону можливих відхилень, ймовірність попадання в i -й розряд:

$$P = \frac{n_i}{n_\Sigma}, \quad (2.3)$$

де n_i - число влучень у i -й розряд;

n_Σ - загальна кількість спрацьовувань лічильників за всіма розрядами.

Якщо весь діапазон не охоплений, то

$$P = \frac{n_i \cdot \Delta t}{T}, \quad (2.4)$$

де Δt - тривалість циклу роботи елемента часу.

Після виробництва вимірювань ми насамперед отримуємо значення ймовірності P_i попадання у допустимий діапазон.

Отримане значення ймовірності P_i дозволяє оцінити тільки якість, але не дає жодної інформації про причини низької якості напруги (якщо $P > 0,95$, то якість напруги незадовільна).

За значеннями ймовірностей знаходження δU_i у кожному розряді та за параметрами числових характеристик розподілу статистичного ряду будується гістограма.

При побудові гістограми закон розподілу випадкової величини відхилення напруги графічно представляється у дискретній формі сходишковою лінією, на якій будується крива розподілу, що виражає залежність між можливими значеннями відхилень напруги та ймовірностями їхнього виникнення.

Тут ймовірність графічно зображується площею, обмеженою кривою $f(\delta U_i)$.

Вигляд, який приймає крива випадкової функції протягом розглядуваного періоду часу, називається її реалізацією.

Як період реалізації приймаємо повний цикл, тобто повне число діб, а також тиждень [17].

У деяких випадках достатньо характеризувати випадкову функцію у найбільш суттєвих перетинах за часом, наприклад, у режимах найбільших і найменших навантажень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення завдання розробки заходів із покращення якості напруги необхідно характеризувати випадкові величини числовими параметрами.

Відповідно до отриманих числових характеристик плануються заходи з оптимізації того чи іншого фактора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Числові характеристики відхилення напруги у розподільчих мережах залізорудних шахт

Однією з основних числових характеристик відхилення напруги є математичне очікування $\delta\bar{U}$, характеризує середню величину відхилення напруги від його номінального значення $U_{ном}$.

Визначає положення значень відхилення напруги на числовій осі:

$$\delta\bar{U} = \sum_{i=1}^n \delta U_i \cdot P_i \quad (2.5)$$

Математичне очікування — це сума добутків усіх можливих значень випадкової величини на їхні ймовірності.

Оскільки більшість електроприймачів споживають потужність пропорційно квадрату напруги, якість останньої також визначається за величиною квадрата середньоквадратичного відхилення напруги за період часу T , який називається нерівномірністю напруги:

$$N = (V_{ск})^2 = \sum_{i=1}^n \delta U_i^2 \cdot P_i \quad (2.6)$$

За параметрами математичного очікування та нерівномірності напруги визначається дисперсія випадкової величини D , що характеризує міру відхилення випадкової величини від середнього значення.

Дисперсія є математичним очікуванням квадрата відхилення напруги від її математичного очікування, тобто визначає міру розсіювання напруги навколо її середнього значення:

$$D = (V_{ск})^2 - \delta \bar{U}^2 = N - \delta \bar{U}_i^2. \quad (2.7)$$

У той час як при визначенні N величина відхилення напруги вимірюється від обраного початку відліку (від номінального значення), при визначенні дисперсії величина відхилення вимірюється від середнього її значення [14, 18]. Таким чином, величина дисперсій не залежить від обраного початку відліку.

Поряд з дисперсією для характеристики ступеня розсіювання випадкової величини використовуємо стандартне відхилення, пов'язане з дисперсією співвідношенням: $\sigma = \sqrt{D}$.

Перевага цієї числової характеристики полягає в тому, що його розмірність збігається з розмірністю δU_i , тоді як D має розмірність її квадрата.

Дисперсія D є математичним очікуванням квадрату відхилення напруги від її математичного очікування або розсіюванням напруги навколо її середнього значення.

Математичне очікування $\delta \bar{U}$ Математичне очікування та дисперсія D визначають найважливіші риси розподілу: його положення та ступінь розкиданості.

Менше стандартне відхилення, за інших рівних умов, відповідає меншій ймовірності виходу напруги за допустимі межі та в певній мірі визначає достатність регулювання напруги в мережі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Практична реалізація оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт

3.1. Оцінювання показників якості електроенергії у розподільчих мережах залізорудних шахт та отримання однорідної та достовірної інформації на основі аналізу годинних точних графіків навантажень участкових підземних підстанцій

Відповідно до схем електропостачання шахт при виконанні вимірювань, оцінка параметрів якісних показників електропостачання підземних ЕП здійснювалася в першу чергу на ЛЕП з максимальним електричним навантаженням [19].

З метою отримання однорідної та достовірної інформації на основі аналізу годинних точних графіків навантажень участкових підземних підстанцій, репрезентативність вибірки обмежувалася кількістю реалізацій тривалістю 5-6 діб, що не суперечить результатам досліджень, проведених в аналогічних умовах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 3	Лім.	Лист	Листів
Розробив	Ровков А.С.						20	16
Перевірів	Сінчук О.М.							
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЗЕЕМ-23ск		

3.2. Результати вимірювань відхилень напруги у розподільчих мережах залізничних шахт та отримання однорідної та достовірної інформації на основі аналізу годинних точних графіків навантажень участкових підземних підстанцій

Результати вимірювань відхилень напруги за вказаними об'єктами представлені, відповідно в табл.3.1.; 3.2; 3.3 та 3.4.

Метою математичної обробки отриманих вимірювань є визначення числових характеристик розподілу.

Насамперед обчислюємо проміжні величини всередині періоду вибірки:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n P_i K_i = \frac{\sum_{i=1}^n n_i k_i}{n_{\Sigma}}, \quad (3.1)$$

де P_i - ймовірність попадання значень напруги до i -го розряду

n_i - кількість влучень, за даними вимірів δU_i в i -й розряд;

k_i - номер інтервалу згідно з розбивкою.

Дисперсія даної проміжної величини:

$$D_{\bar{A}} = \sum_{i=1}^n P_i K_i - \bar{A}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n n_i k_i^2}{n_{\Sigma}} - \bar{A}^2 \quad (3.2)$$

Математичне очікування δU_l , відхилень напруги по кожному циклу реалізації:

$$\delta U_l = \delta U_o + \Delta U \cdot \bar{A}, \quad (3.3)$$

де δU_o - значення середини інтервалу при $k_i = 0$;

ΔU - ширина розряду, В.

Стандартне відхилення величини напруги $\sigma_i = \Delta U \sqrt{D_{\bar{A}}}$.

За величиною квадрата середньоквадратичного відхилення досліджуваної величини визначаємо значення дисперсії, що характеризує міру коливання ознаки $D = \sigma_i^2$.

Результати розрахунків числових характеристик кожної серії вимірів
представлені таблицях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1

Ввід № 2

Номер інтервалу	1	2	3	4	5	6	7	8	$\sum n_i$
Дата									
11.07.22	3292	0090	8147	1145	5761	9138	1795	3514	
12.07.22	3292	0090	8442	1145	6559	9259	1795	3514	
	0	0	295	0	798	119	0	0	
13.07.22	3292	0090	8835	1145	7309	9279	1795	3514	
	0	0	393	0	750	20	0	0	
14.07.22	3292	0091	8858	1145	7658	9282	1795	3514	
	0	1	23	0	349	3	0	0	
15.07.22	3292	0091	0891	1145	9633	9857	1832	3514	
	0	0	2033	0	1975	575	37	0	
16.07.22	3292	0091	0900	1145	0239	0371	1832	3514	
	0	0	9	0	606	514	0	0	
17.07.22	3292	0091	1565	1145	0762	0396	1832	3514	
вибух	0	0	665	0	523	25	0	0	
18.07.22	3292	0091	2673	1145	0808	0396	1832	3514	
	0	0	1108	0	46	0	0	0	
19.07.22	3292	0093	3561	1145	0918	0396	1832	3514	
	0	2	888	0	110	0	0	0	
20.07.22	3292	0100	6323	1145	2019	0396	1832	3514	
	0	7	2762	0	1101	0	0	0	
21.07.22	3292	0216	6995	1145	2029	0396	1832	3514	
	0	116	672	0	10	0	0	0	
22.07.22	3292	0613	7470	1145	2071	0396	1832	3514	
	0	397	475	0	42	0	0	0	
23.07.22	3292	0789	8111	1145	2078	0396	1832	3514	
	0	176	641	0	7	0	0	0	
24.07.22	3292	0941	1321	1145	3102	0408	1832	3514	
	0	152	3210	0	1024	12	0	0	
Ймовірність $\Sigma \Delta$	0	851	13174	0	7341	1268	37	0	22671
Ймовірність P_i	0	0,0641	0,544	0	0,3354	0,055	0,006		1,0
$\delta U_i = (U_i - 100)$	-	-6,5	-1,5		+1	+4	+7		

Результати розрахунку

Математичне очікування: $\delta \bar{U} = \Sigma(100 - U_i)P_i$

$$\begin{aligned}\delta \bar{U}_I &= 6,5 \cdot 0,064179 + 1,5 \cdot 0,543857 - 0,335466 - 4 \cdot 0,055878 - \\ &- 7 \cdot 0,000616 = 0,417163 + 0,815785 - 0,335466 - 0,223512 - \\ &- 0,004312 = 0,669657\%\end{aligned}$$

Неоднаковість: $N = \sum_{i=1}^n (100 - U_i)^2 P_i$

$$\begin{aligned}N &= 42,25 \cdot 0,064179 + 2,25 \cdot 0,543857 + 0,335466 + 16 \cdot 0,55878 + \\ &+ 49 \cdot 0,000612 = 2,711562 + 1,223678 + 0,335466 + 0,894048 + \\ &+ 0,030184 = 5,194938 \text{ (B}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$N = 5,194938$$

$$Д = 5,194938 - 0,448441 = 4,746497$$

$$\sigma = \sqrt{4,76497} = 2,18$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\delta U_i = 5,194938 = -2,28\%$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2

Номер інтервала	1	2	3	4	5	6	7	8	Σn_i
Дата									
11.07.22	7803	4228	8741	9147	2901	5080	4861	9064	
12.07.22	7803	4228	8816	9147	4037	5410	4861	9064	
	0	0	75	0	1136	330	0	0	
13.07.22	7803	4228	8863	9147	4946	5466	4861	9064	
	0	0	47	0	909	56	0	0	
14.07.22	7803	4228	4244	9147	5849	5707	4861	9064	
	0	0	381	0	903	241	0	0	
15.07.22	7803	4228	9330	9147	8672	7349	4881	9064	
	0	0	86	0	2823	1642	37	0	
16.07.22	7803	4228	9332	9147	9979	7627	4881	9064	
	0	0	2	0	1307	278	0	0	
17.07.22	7803	4228	9421	9147	1165	7697	4881	9064	
вибух	0	0	89	0	1186	70	0	0	
18.07.22	7803	4228	0225	9147	1899	7697	4881	9064	
	0	0	804	0	734	0	0	0	
19.07.22	7803	4228	1135	9147	2435	7699	4881	9064	
	0	0	910	0	536	2	0	0	
20.07.22	7803	4228	2477	9147	4829	8074	4881	9064	
	0	0	1342	0	2394	375	0	0	
21.07.22	7803	4228	3749	9147	4990	8074	4881	9064	
	0	0	1262	0	161	0	0	0	
22.07.22	7803	4263	4921	9147	5149	8074	4881	9064	
	0	35	1182	0	159	0	0	0	
23.07.22	7803	4267	6151	9147	5360	8074	4881	9064	
	0	4	1230	0	211	0	0	0	
24.07.22	7803	4267	8881	9147	8448	8469	4881	9064	
	0	0	2730	0	3088	395	0	0	
Ймовірність $\Sigma \Delta$	0	39	10140	0	15547	3389	20	0	22671
Ймовірність P_i	0	0,0021	0,38	0	0,527	0,09	0,0003	0	1,0
$\delta U_i = (U_i - 100)$	-	-13	-7,5		-4	-2,5	3		

Результати розрахунку

Математичне очікування: $\delta \bar{U} = \Sigma(100 - U_i)P_i$

$$\delta \bar{U}_l = 13 \cdot 0,002167 - 7,5 \cdot 0,380409 - 4 \cdot 0,527077 - 2,5 \cdot 0,090009 - 3 \cdot 0,000336 = -5,214578$$

Неоднаковість $N = \sum_{i=1}^n (100 - U_i)^2 P_i$

$$N = 169 \cdot 0,002169 + 56,25 \cdot 0,380409 + 16 \cdot 0,527073 + 2,25 \cdot 0,90009 - 9 \cdot 0,000336 = 0,366561 + 21,398 + 8,433168 + 0,20252 + 0,003024 = 30,40327 (B^2)$$

Дисперсія: $N - \sigma \bar{U}^2, B^2$

$$D = 30,40327 - 27,19182 = 3,21145^2$$

$$\sigma = \sqrt{3,21145} = 1,79 B$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Відхилення: $\delta U\% = \sqrt{N} = \sqrt{30,40327} = -5,53\%$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3

Номер інтервала	1	2	3	4	5	6	7	8	$\sum n_i$
Дата									
11.07.22	6731	1796	1329	0603	3884	4940	0970	5574	
12.07.22	6731	2641	1329	0627	4951	4940	0970	5574	
	0	845	0	24	1067	0	0	0	
13.07.22	6731	3621	1329	0655	6084	4940	0970	5574	
	0	980	0	28	1133	0	0	0	
14.07.22	6731	5295	1329	0672	6629	4940	0970	5574	
	0	1674	0	17	545	0	0	0	
15.07.22	6732	7475	1329	0721	0730	5074	0970	5574	
	1	2180	0	49	4101	134	0	0	
16.07.22	6736	7575	1330	0726	2755	5079	0973	5574	
	4	100	1	5	2025	2	3	0	
17.07.22	6737	0725	1330	2389	7043	5089	2553	9067	
вибух	1	3150	0	1663	4288	13	1580	3493	
18.07.22	6737	0967	1330	2389	7128	5090	2575	9071	
	0	87	0	0	75	1	22	4	
19.07.22	6738	2237	1330	2852	7206	5090	2575	9075	
	1	1270	0	463	78	0	0	0	
20.07.22	6738	4977	1330	5148	8099	5090	2575	9075	
	0	2740	0	2296	893	0	0	0	
21.07.22	6738	6897	1330	5235	8116	5090	2575	9075	
	0	1920	0	87	17	0	0	0	
22.07.22	6739	8738	1330	5384	8119	5090	2575	9075	
	1	1841	0	149	75	0	0	0	
23.07.22	6739	9959	1330	6165	8196	5090	2575	9075	
	0	1221	0	781	5	0	0	0	
24.07.22	6739	2120	1330	0649	9586	5090	2575	9075	
	0	2161	0	4484	1390	0	0	0	
Ймовірність $\Sigma\Delta$	8	20169	1	10046	15692	150	1605	3497	51168
Ймовірність P_i	0,000278	0,53698	0,00004	0,1589	0,301	0,0019	0,0001	0	
Номер інтервала k_i	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	

Результати розрахунку

$$\bar{A} = \sum K_i P_i$$

$$\begin{aligned} \bar{A} = & -0,000278 \cdot 3 - 0,536984 \cdot 2 - 0,000042 + 0,301682 + 0,001969 \cdot 2 \\ & + 0,000127 \cdot 3 = -0,000278 - 1,073968 - 0,000042 + 0,301682 + \\ & + 0,003938 + 0,000381 = -0,768286 \end{aligned}$$

$$D_{\bar{A}} = \sum K_i^2 P_i - \bar{A}^2$$

$$\begin{aligned} D_{\bar{A}} = & -0,000278 \cdot 9 - 0,536984 \cdot 4 - 0,000042 + 0,301682 + 0,001969 \cdot 4 \\ & + 0,000127 \cdot 9 - 0,590264 = 0,002502 + 2,147936 - 0,000042 + \\ & 0,301682 + 0,007876 + 0,001143 - 0,590264 = 1,870917 \end{aligned}$$

Числовые характеристики гистограммы

Математичне очікування: $\delta \bar{U} = U_o + \Delta U \cdot \bar{A}$

$$\delta \bar{U} = -1,875 + 3,75(-0,768287) = -4,756076\%$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Дисперсія: $D = \Delta U^2 \cdot D_{A^2} - \frac{1}{12}$

$$D = (3,75)^2 \cdot D_{A^2} - \frac{1}{12} = (3,75)^2 \cdot 1,870917 - 0,083333 = 26,226443 \text{ } (\%)^2$$

Стандартне відхилення: $\sigma = \sqrt{D}$

$$\sigma = \sqrt{26,226443} = 5,12\%$$

Неоднаковість: $N = D + \delta U^2$

$$N = 26,226443 + (-4,756076)^2 = 48,84668 (\%^2)$$

Відхилення: $\delta U\% = \sqrt{N} = \sqrt{48,84668} = 6,95\%$ від $U_{ном}$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Таблиця 3.4

Номер інтервала	1	2	3	4	5	6	7	8	$\sum n_i$
Дата									
8.07.22	2823	2658	4026	2980	6729	3821	1131	4610	
9.07.22	2823	4991	4242	2980	6729	3821	1131	4610	
	15	2333	0	0	0	0	0	0	
22.07.22	3294	6985	4360	2980	6729	3821	1131	4610	
	456	1994	118	0	0	0	0	0	
28.07.22	3702	1924	6731	3042	6731	3821	1131	4610	
	409	4939	2371	62	1	0	0	0	
24.07.22	3760	3111	8058	3044	6731	3822	1131	4610	
	57	1187	1327	2	0	1	0	0	
25.07.22	4082	4962	8081	3044	6731	3822	1131	4610	
	322	1851	23	0	0	0	0	0	
26.07.22	5256	6509	8081	3044	6731	3822	1131	4610	
	1174	1547	0	0	0	0	0	0	
27.07.22	6613	7645	8081	3044	6732	3822	1131	4610	
	1357	1136	0	0	1	0	0	0	
21.07.22	6792	8019	8081	3044	6732	3822	1131	4610	
	179	374	0	0	0	0	0	0	
22.07.22	7123	8022	8081	3044	6732	3822	1131	4610	
	331	3	0	0	0	0	0	0	
27.07.2	8734	0103	8081	3044	6732	3822	1131	4610	
	1611	2081	1	0	0	0	0	0	
Ймовірність $\Sigma\Delta$	5911	17445	3840	64	2	1	0	0	27263
Ймовірність P_i	0,277	0,6515	0,12	0,001	0,00101	0,000048	0	0	
Номер інтервала k_i	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	

Результати розрахунку

$$\bar{A} = \sum K_i P_i$$

$$\begin{aligned}\bar{A} &= -0,227066 \cdot 3 - 0,651541 \cdot 2 - 0,120141 \cdot 1 + 0,000141 \cdot 1 + 0,000048 \cdot 2 = \\ &= -0,6811988 - 1,303082 - 0,1201412 + 0,000141 + 0,000096 = \\ &= -2,104211\end{aligned}$$

$$D_{\bar{A}} = \sum K_i^2 P_i - \bar{A}^2$$

$$\begin{aligned}D_{\bar{A}} &= -0,227066 \cdot 9 - 0,651541 \cdot 4 + 0,120141 + 0,000141 + 0,000048 \cdot 4 - \\ &- 4,427703 = 2,043594 + 2,606164 + 0,120141 + 0,000141 + \\ &+ 0,000192 - 4,427703 = 0,342502\end{aligned}$$

Числові характеристики гістограми

Математичне очікування: $\delta \bar{U} = U_o + \Delta U \cdot \bar{A}$

$$\delta \bar{U} = -1,875 + 3,75(-2,104111) = -9,765791\%$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дисперсія: $D = \Delta U^2 \cdot D_{A^2} - \frac{1}{12}$

$$D = (3,75)^2 \cdot D_{A^2} - \frac{1}{12} = (3,75)^2 \cdot 0,342502 - 0,083333 = 4,733101(\%)^2$$

Стандартне відхилення: $\sigma = \sqrt{D}$

$$\sigma = \sqrt{4,733101} = 2,1756\%$$

Неодинаковість: $N = D + \delta U^2$

$$N = 4,733101 + (-9,765791)^2 = 100,1037(\%^2)$$

Відхилення: $\delta U\% = \sqrt{N} = \sqrt{100,1037} \approx -10\%$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Проаналізувати чинну нормативно-правову базу та стандарти (зокрема ДСТУ EN 50160 та IEEE 519) стосовно вимог до якості електроенергії (ЯЕ) у системах промислового електропостачання.

Дослідити структуру та режими роботи основних споживачів залізрудних шахт як джерел електромагнітних завад (потужних тиристорних перетворювачів шахтних підйомних машин, частотно-регульованих приводів вентиляторів головного провітрювання та насосів водовідливу).

Розробити алгоритм та структуру системи безперервного автоматизованого моніторингу ЯЕ на межі балансової належності та на внутрішньошахтних підстанціях.

Дослідити явище резонансу на вищих гармоніках у розгалужених кабельних мережах напругою 6–10 кВ залізрудних шахт, що мають значну власну ємність.

Обґрунтувати рекомендації щодо вибору типу, параметрів та місць встановлення засобів підвищення якості електроенергії (пасивних, активних та гібридних фільтрокомпенсуючих пристроїв).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Список використаних джерел

1. Жежеленко, І. В. (2010). Показники якості електроенергії та їх контроль на промислових підприємствах. Київ: Техніка.
2. Півняк, Г. Г., & Волошин, О. В. (2011). Електропостачання гірничих підприємств. Дніпропетровськ: НГУ.
3. Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). Power System Harmonics (2nd ed.). John Wiley & Sons.
4. Fuchs, E., & Masoum, M. A. (2015). Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (2nd ed.). Academic Press.
5. Bollen, M. H. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press.
6. Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2012). Electrical Power Systems Quality (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
7. Синчук, О. М., & Кузнецов, В. В. (2017). Електромагнітна сумісність в електротехнічних комплексах залізорудних шахт. Кривий Ріг: КНУ.
8. Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
9. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Power and Energy Society.
10. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Держспоживстандарт України.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251-14	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods. International Electrotechnical Commission.
12. Sankaran, C. (2002). Power Quality. CRC Press.
13. Shchutsky, V. I., & Babokin, G. I. (2008). Electromagnetic environment in power systems of underground iron ore mines. Journal of Mining Science, 44(3), 289-295.
14. Volkov, A., & Spivak, O. (2018). Resonance phenomena in deep iron ore mine cable networks under harmonic distortions. E3S Web of Conferences, 60, 02004.
15. Heydt, G. T. (1991). Electric Power Quality. Stars in a Circle Publications.
16. Ghosh, A., & Ledwich, G. (2002). Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Springer Science & Business Media.
17. Zachepa, I., & Chorny, O. (2020). Impact of frequency-controlled electric drives of mine fans on power quality indicators. Electrical Engineering & Electromechanics, (2), 47-53.
18. Paice, D. A. (1995). Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power. IEEE Press.
19. Moreno-Muñoz, A. (Ed.). (2007). Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment. Springer.
20. Кузнецов, В. Г., & Ніколаєнко, В. Г. (2014). Аналіз та нормалізація режимів за якістю електроенергії в системах промислового електропостачання. Київ: Наукова думка.