

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.75>

УДК 621.316.1:681.513.1

Аналіз показників якості електроенергії при розбудові розумної електромережі підземного рудника

Сінчук Олег Миколайович¹⁾

Д-р техніч. наук, професор, завідувач кафедри Електричної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9078-7315>, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095

Михайленко Олексій Юрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-6652>, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215

Сінчук Ігор Олегович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7702-4030>, olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 55327932300

Котякова Марина Геннадіївна¹⁾

Аспірант кафедри Електричної інженерії
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5667-1354>, kotyakova@ukr.net

¹⁾ Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50027, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі показані результати експериментальних досліджень показників якості електроенергії в системі електропостачання підземного залізничного рудника при плануванні розробки розумної електромережі. Вимірювання проводилися спеціалізованим обладнанням у точках електромережі з рівнями напруги 6 і 0,4 кВ. Проаналізовано ключові показники якості електроенергії, як-то відхилення напруги, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струму й напруги, а також відхилення частоти. Встановлено, що в мережі 6 кВ падіння напруги знаходиться в межах гранично допустимого рівня (+/-10 %). У частині електромережі з рівнем напруги 0,4 кВ виникають критичні відхилення напруги, які перевищують стандартизовану межу. Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги та струму, а також частота тут знаходяться в межах норми. На основі отриманих даних виявлено системний характер проблем з якістю напруги у віддалених від поверхні вузлах системи електропостачання підземного рудника. Це вимагає потребує виконання детального технічного аудиту стану кабельних ліній, трансформаторів, а також оцінки можливості застосування спеціалізованих засобів компенсації падінь напруги (наприклад, динамічних відновлювачів напруги, статичних компенсаторів тощо). Такі заходи є необхідними для забезпечення стабільного та надійного електропостачання в умовах розбудови розумної електромережі підземного залізничного підприємства, що має ключове значення для забезпечення надійного електропостачання підземних електроприймачів та поліпшення конкурентоспроможності гірничорудного виробництва.

Ключові слова: розумна електромережа; підземне залізничне підприємства; якість електроенергії; статистичний аналіз

Складні сучасні умови, в яких функціонують вітчизняні гірничорудні підприємства, впливають на роботу комплексу: електропостачання – електроспоживання цих підприємств. Одним із системоутворюючих факторів негативного впливу на режими роботи гірничорудних підприємств, як і всіх інших їх промислових видів є ситуація, котра сталася в Україні з 2014 року. Саме з початку цього періоду часу підприємства країни не функціонують в звичному – нормальному режимі [1, 2].

Більше того, в окремі місяці окремі підприємства взагалі не працювали. Тому експерименти, котрі проводились раніше по визначенню показників якості електроенергії (ПЯЕ) не є показником цілісних реалій і більше того, як свідчать аналогічні дослідження в умовах даних підприємств в попередні роки, різниця в відхиленнях ПЯЕ, а точніше в рівнях відхилення напруги (ΔU) в підземних мережах даного підприємства значно перевищувала показники сьогодення. Проте, тенденція в співвідношеннях окремих ПЯЕ мало змінилась.

В процесі дослідницьких експериментів у 2025 році за домовленістю з відповідальними працівниками енергослужби вищезначеного підприємства та у відповідності до розділів ПТБ, на основі розробленого та затвердженого керівником підприємства плану проведення експериментів в його реалізації приймали участь працівники енергослужби вищезгаданого підприємства та науковці кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Для проведення вимірювання використовувався прилад НРМ-4 (ver ME-440), який є портативним реєстратором якості електроенергії. Місця вимірювань схематично для умов конкретного рудника на правах шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» показані на рис. 1.

Комплекс експериментальних досліджень фактичного стану ПЯЕ проводився у відповідності до існуючих рекомендацій [3, 4] на діючих підземних рудниках. Дані реєструвалися з інтервалом в 1 хвилину протягом декількох діб. Потім було проведено статистичний аналіз та визначено відхилення напруги від стандартизованих значень, максимальні і середні СКГС напруги і струму та розмах коливання частоти. Результат обробки для електромережі 6 кВ приведений в табл. 1 і табл. 2.

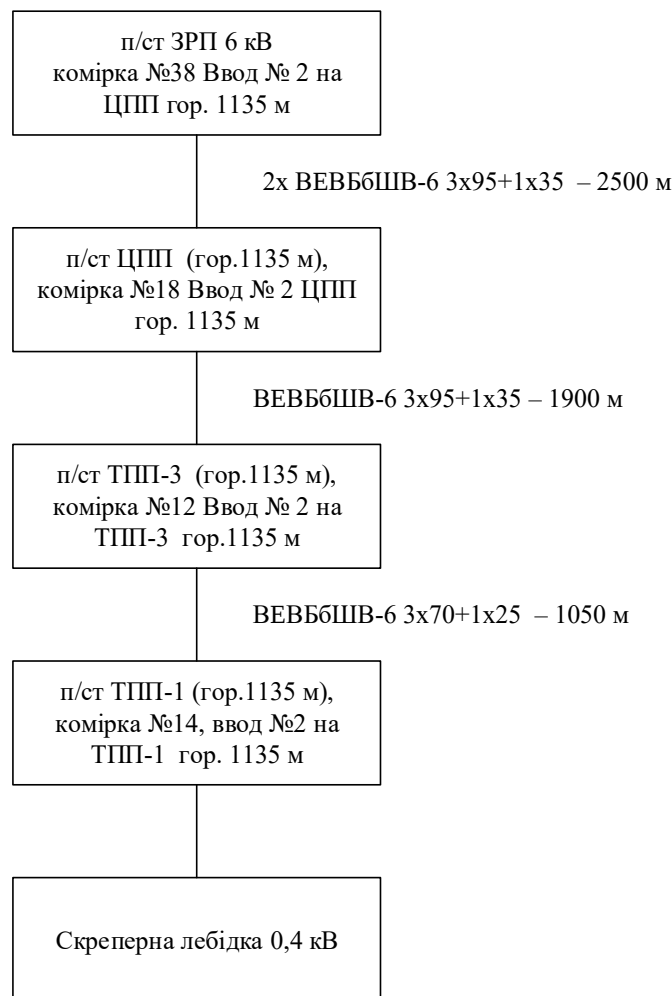


Рис. 1. Логістика структури проведення вимірювань показників якості електроенергії в електромережі підземного рудника на правах шахти (№ 9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Проводячи аналіз даних про падіння напруги (табл. 1 і табл. 2) в електромережі 6 кВ підземного рудника, простежується те, що падіння фазних напруг знаходяться між значеннями -6,1 % і -8,9 %.

Максимальні падіння спостерігаються в ТПП-1 і ТПП-3, де значення наближені до стандартизованих границь. Найвище падіння напруги (-8,89 %) серед всіх вимірів в рудничній електромережі мало місце на фазі С ТПП-1 05.02.2025. Це на 1,11 % нижче допустимих -10 %. Тут же на фазі В падіння було -8,38 %, а на фазі А ТПП-1 – -8,1 % того ж дня. Отже, проблема системна.

Не краща ситуація і у ТПП-3. Того ж дня 05.02.2025, падіння фазної напруги на А і В становила -8,6 %, а на фазі С – -8,21 %. Це дещо, але не дуже, краще ніж на ТПП-1. Проте це все ще близько до стандартизованих -10 %.

Таблиця 1. Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (комірка 38 і комірка 18)

Місце	Комірка 38			Комірка 18		
Дата	27.01.25	28.01.25	29.01.25	29.01.25	30.01.25	31.01.25
ΔU_A , %	-6,66	-6,59	-6,83	-7,91	-7,47	-7,72
ΔU_B , %	-6,4	-6,28	-6,1	-7,87	-7,76	-7,05
ΔU_C , %	-6,36	-6,14	-6,69	-7,55	-7,75	-7,44
СКГС(U_A)						
max, %	0,82	0,86	1,18	1,16	1,61	1,67
сер, %	0,61	0,61	0,85	0,84	0,98	1,04
СКГС(U_B)						
max, %	0,74	0,7	1,59	1,16	1,42	1,58
сер, %	0,6	0,46	0,84	0,84	0,55	0,55
СКГС(U_C)						
max, %	0,68	0,7	1,17	1,16	1,44	1,65
сер, %	0,48	0,46	0,84	0,84	0,74	0,77
СКГС(I_A)						
max, %	5,06	0,78	1,77	1,77	5,59	2,79
сер, %	4,41	0,55	1,25	1,25	2,86	2,38
СКГС(I_B)						
max, %	4,52	0,78	2,26	2,26	4,9	2,8
сер, %	3,97	0,54	1,51	1,51	2,66	2,23
СКГС(I_C)						
max, %	4,45	0,81	2,2	2,2	4,58	2,87
сер, %	3,65	0,684	1,73	1,73	2,55	2,34
f_{Amax} , Гц	50,09	50,08	50,1	50,1	50,09	50,05
	(+0,18 %)	(+0,16%)	(+0,2%)	(+0,2 %)	(+0,18 %)	(+0,1 %)
f_{Amin} , Гц	49,92	49,93	49,92	49,92	49,94	49,91
	(-0,16 %)	(-0,14 %)	(-0,16 %)	(-0,16 %)	(-0,12 %)	(-0,18 %)
f_{Bmax} , Гц	50,09	50,16	50,13	50,13	50,01	50,22
	(+0,18 %)	(+0,32 %)	(+0,36 %)	(+0,36 %)	(+0,02 %)	(+0,44 %)
f_{Bmin} , Гц	49,92	49,93	49,95	49,95	49,91	49,92
	(-0,16 %)	(-0,14 %)	(-0,04 %)	(-0,04 %)	(-0,12 %)	(-0,16 %)
f_{Cmax} , Гц	50,08	50,08 %	50,18	50,18	50,44	50,27
	(+0,16 %)	(+0,16 %)	(+0,26 %)	(+0,26 %)	(+0,88 %)	(+0,54 %)
f_{Cmin} , Гц	49,94	49,91	49,98	49,98	49,92	49,98
	(-0,12 %)	(-0,18 %)	(-0,1 %)	(-0,1 %)	(-0,16 %)	(-0,04 %)

Якщо співставляти з вищезначеними даними, то в комірці 18 падіння напруги були порівняно меншими: максимальне падіння 29.01.2025 у фазі А -7,91 %, у той же день падіння у фазі В -7,87 % та 30.01.2025 у фазі С -7,75 %. Дещо краща ситуація в комірці 38. Тут було виміряно найбільше падіння для цієї точки 29.01.2025 у фазі А -6,83 %, в той же день у фазі С -6,69 % та 27.01.2025 у фазі С -6,36 %.

Вимірянні в шахті дані (табл. 1 і табл.2) вказують на те, що найгірші ПЯЕ за падінням напруги мають місце в ТПП-1 та ТПП-3 електромережі підземного рудника. Тут значення близькі до стандартизованих гранично допустимих і перевищують показники комірок 18 і 38

на в середньому до 2 %. Отже чим далі точка виміру від поверхні рудника і ближче до місць проведення робіт з видобутку залізної руди, тим більше падіння напруги.

Таблиця 2. Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (ТПП-3 і ТПП-1)

Місце	ТПП-3			ТПП-1		
Дата	03.02.25	04.02.25	05.02.25	05.02.25	06.02.25	07.02.25
ΔU_A , %	-7,29	-7,94	-8,1	-8,6	-7,18	-7,29
ΔU_B , %	-7,09	-7,13	-8,38	-8,6	-7,53	-7,09
ΔU_C , %	-7,14	-7,15	-8,89	-8,21	-7,97	-7,14
СКГС(U_A)						
max, %	2,05	2,05	3,59	3,59	1,32	1,35
сер, %	1,07	1,07	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_B)						
max, %	1,85	1,85	1,45	2,58	1,32	1,35
сер, %	0,61	0,61	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_C)						
max, %	1,94	1,94	1,3	1,3	1,32	1,35
сер, %	0,82	0,82	0,69	0,69	0,69	0,83
СКГС(I_A)						
max, %	2,59	3,55	3,64	3,78	2,87	2,98
сер, %	2,48	1,8	1,89	1,52	1,54	1,97
СКГС(I_B)						
max, %	2,8	4,46	3,04	3,71	2,77	2,75
сер, %	2,38	2,2	1,85	2,06	1,97	1,76
СКГС(I_C)						
max, %	2,68	3,87	3,55	3,11	2,96	2,69
сер, %	2,07	2,04	1,75	2,34	1,79	1,62
f_{Amax} , Гц	50,1 (+0,2 %)	50,08 (+0,16 %)	50,41 (+0,82 %)	50,41 (+0,82%)	50,1 (+0,2 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Amin} , Гц	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2 %)	49,92 (-0,16%)	49,92 (-0,16%)	49,9 (-0,2%)	49,93 (-0,14 %)
f_{Bmax} , Гц	50,12 (+0,24 %)	50,15 (+0,3 %)	50,16 (+0,32 %)	50,16 (+0,32%)	50,12 (+0,24 %)	50,09 (+0,18 %)
f_{Bmin} , Гц	49,84 (-0,32 %)	49,87 (-0,26 %)	49,87 (-0,26%)	49,87 (-0,26%)	49,86 (-0,28%)	49,9 (-0,2%)
f_{Cmax} , Гц	50,11 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,1 (+0,2 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Cmin} , Гц	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2 %)	49,92 (-0,16 %)	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2%)	49,93 (-0,14 %)

Проводячи аналіз сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень (СКГС) струму й напруги в електромережі 6 кВ підземного рудника (табл. 2.2 і табл.2.3) простежується те, що для напруги максимальні значення СКГС було досягнуто 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 у фазі А, а саме 3,59 %, що на 4,41 % нижче стандартизованого гранично допустимого значення цього ПЯЕ 8 %. У загальному варіанті в середньому значення СКГС напруги були між 0,46% (28.01.2025 комірка 38 у фазах В і С) та 1,07 % (03.02.2025 і 04.02.2025 у фазі А ТПП-1). Отже ПЯЕ за СКГС напруги мають досить прийнятну якість, окрім вищезначеного випадку.

За СКГС струму простежувався більший розмах значень. Це в принципі притаманне цьому ПЯЕ через свою високу залежність від типу електроспоживачі, що підключені до

електромережі рудника. Максимальне значення 5,59 % мало місце 30.01.2025 у фазі А комірці 18, що є близьким до стандартизованих 8 % для гармонік струму. У загальному варіанті в середньому значення СКГС струму були між 0,54 % у фазі В комірці 38 (28.01.2025) і 4,41 % у фазі А комірці 38 (27.01.2025).

Відзначаємо, що середній СКГС струму 30.01.2025 у комірці 18 становив 2,86 %, 2,66 % та 2,55 %, у фазах А, В і С, відповідно. Це вказує на системне зростання струмових гармонік у цій комірці. На це потрібно звернути увагу оперативному персоналу.

Також відзначаємо, що 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 були однакові максимальні значення СКГС напруги 3,59 %, що може вказувати на небажану якість роботи СЕП рудника. При цьому СКГС струму у той же день мали різні значення: 3,64 % і 1,52 % у фазі А ТПП-1 і ТПП-3, відповідно.

У комірці 38 також простежувалися показові результати. Якщо 27.01.2025 піковий СКГС струму був 5,06 %, то наступного дня він становив 0,78 %. Це вказує на те, що 27.01.2025 працював нелінійний споживач, як-то шахтна підймальна установка, скіпова або клітьова. Середньодобові значення СКГС струму в цій комірці були між 0,55 % і 4,41 %, що вказує на суттєве коливання цього ПЯЕ в аналізованій СЕП.

Аналіз показав, що СКГС як за струмом, так і за напругою в рудничній електромережі 6 кВ не досягають стандартизованих гранично допустимих значень, що визначаються нормативною документацією для цього ПЯЕ. Але незважаючи на загальну задовільну якість роботи СЕП за СКГС, в окремих вузлах мало місце підвищення гармонік, що вказує на зниження ПЯЕ. Прикладом є вищезначені збільшення СКГС напруги у ТПП-1 та СКГС струму в комірці 18.

Щодо частоти як ПЯЕ, то найбільше відхилення від стандартизованого граничного значення 1 %, якщо співставляти з іншими, мало місце на фазі С у комірці 18 30.01.2025. Воно мало значення 50,44 Гц (+0,88 %), що є найвищим відхиленням у «плюс» від 50 Гц серед усіх зафіксованих вимірів. Найбільше відхилення у «мінус» було 03.02.25 на фазі В ТПП-3 49,84 Гц (-0,32 %).

Якщо розглядати ТПП-1 і ТПП-3, найбільше частот вище 50 Гц зростала 05.02.2025 у їх фазах А, а саме 50,41 Гц (+0,82%). Значення частоти не перевищувало допустимого, проте було близько до межі. В цих же ТПП-1 і ТПП-3 на фазах В у той же день відхилення було 49,87 Гц (-0,26%). Тут якість частоти у стандартизованих межах. Проте падіння нижче 50 Гц свідчить про певну нестійкість роботи електромережі в цей день за цим ПЯЕ.

У комірці 38 частота відхилялася від стандартизованої значно менше. Так відхилення були не більше 50,13 Гц (+0,36%) 29.01.2025 і не менше 49,91 Гц (-0,18%) 28.01.2025.

Отже, частота в нормі.

Далі аналізуємо ПЯЕ виміряні приладом безпосередньо на рудничному електроприймачі 0,4 кВ – скреперній лебідці (табл. 3).

Дані щодо ПЯЕ в електромережі підземного рудника 0,4 кВ виявили низку критичних значень, які або наближаються до стандартизованих границь, або перевищують їх. Найбільш серйозні з них спостерігаються у відхиленнях напруги, які систематично перевищують норми. 05.02.2025 на фазі А мало місце найбільше падіння напруги -14,3 %, що більше стандартизованих 10 %. Те ж саме було у той же день на фазі В (-14,29 %) і на фазі С (-14,21%). 06.02.2025, падіння дещо знизилося, проте все ще перевищувало стандартизовану межу: -13,93 %, -13,27 % та -13,19 % на фазах А, В і С, відповідно. Тобто має місце системне перевантаження електромережі 0,4 кВ підземного рудника.

Щодо СКГС напруги, то тут ПЯЕ стабільніші. Найбільший СКГС напруги спостерігався 05.02.2025 на фазі С і дорівнював 2,88 %, що суттєво нижче граничних 8 %. Середні значення СКГС напруги знаходилися між 0,41 % і 0,74 %. Отже якість напруги за цим показником задовільна.

Для СКГС струму пікові значення також в межах норми. Так, найбільше значення спостерігалось на фазі В 05.02.2025 і дорівнювало 2,83 %. У середньому СКГС струму був у межах між 0,88 % і 1,32 %. Тобто, зі за струмовими гармоніками ПЯЕ в нормі.

Таблиця 3. Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ

Дата	04.02.25	05.02.25	06.02.25
ΔU_A , %	-12,6	-14,3	-13,93
ΔU_B , %	-12,45	-14,29	-13,27
ΔU_C , %	-12,14	-14,21	-13,19
СКГС(U_A) max, % сер, %	0,71 0,5	2,03 0,42	1,03 0,42
СКГС(U_B) max, % сер, %	0,68 0,49	2,58 0,45	1,05 0,41
СКГС(U_C) max, % сер, %	1,003 0,74	2,88 0,62	1,19 0,57
СКГС(I_A) max, % сер, %	1,83 0,91	2,1 0,91	2,12 0,88
СКГС(I_B) max, % сер, %	2,75 1,32	2,83 1,23	2,56 1,07
СКГС(I_C) max, % сер, %	2,21 1,18	2,12 1,01	1,94 0,9
f_{Amax} , Гц f_{Amin} , Гц	50,11 (+0,22 %) 49,9 (-0,2 %)	50,08 (+0,16 %) 49,91 (-0,18 %)	50,07 (+0,14 %) 49,92 (-0,16 %)
f_{Bmax} , Гц f_{Bmin} , Гц	50,11 (+0,22 %) 49,9 (-0,2 %)	50,08 (+0,16 %) 49,91 (-0,18 %)	50,07 (+0,14 %) 49,92 (-0,16 %)
f_{Cmax} , Гц f_{Cmin} , Гц	50,11 (+0,22 %) 49,9 (-0,2 %)	50,08 (+0,16 %) 49,91 (-0,18 %)	50,07 (+0,14 %) 49,92 (-0,16 %)

Щодо відхилень частоти, то вони були при всіх вимірах в межах допустимого стандартами 1 %. Найбільше відхилення вище 50 Гц мало місце 04.02.2025 і становило 50,11 Гц (+0,22 %). Нижче 50 Гц частота була також у той же день. Тоді вона дорівнювала 49,9 Гц (-0,2 %). Така стабільність була і в інші дні: 05.02.2025 розмах коливань був у межах між -0,18% і +0,16%, а 06.02.2025 – між -0,16 % і +0,14 %. Отже, в цілому як частина електромережі підземного рудника з напругою 6 кВ, так і з напругою 0,4 кВ не мають проблем з якістю частоти.

Підсумовуючи встановлено, що головною проблемою в електромережі 0,4 кВ підземного рудника є падіння напруги, рівні і розмах яких перевищують стандартизовані граничні значення у середньому до 5 %. Інші ПЯЕ, як-то СКГС струму і напруги або відхилення частоти, залишаються в допустимих стандартами межах, але вони теж мають підлягати постійному моніторингу. Для дотримання стабільного рівня напруги живлення електроприймачів підземного рудника при падіннях напруги необхідно провести аналіз технічного стану обладнання електромережі (трансформаторів, кабельних ліній

електропередачі), рівні навантаження, а також розглянути можливість залучення спеціального обладнання для підтримання напруги живлення в СЕП на стандартизованих рівнях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сінчук І. О. «Коментар до стану електроенергетики залізорудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності: монографія». *ЧП Щербатих А.В.* Кременчук: Україна 2018.
2. Михайленко О. Ю., Сінчук І. О., Котякова М. Г. «Оперативне керування рівнями напруги живлення систем електропостачання підземних рудників : монографія». *Warsaw : iScience Sp. z.o.o.* 2025. ISBN 978-83-68188-22-6.
3. «СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго». *Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго»*. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=94285
4. «ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)». *ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»*). – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51529

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.75>

UDC 621.316.1:681.513.1

Analysis of power quality indicators in the development of a smart grid at an underground mine

Oleh M. Sinchuk¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9078-7315>, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095

Oleksii Yu. Mykhailenko¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-6652>, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215

Ihor O. Sinchuk¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7702-4030>, olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 55327932300

Maryna H. Kotiakova¹⁾

Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5667-1354>, kotyakova@ukr.net

¹⁾ Kryvyi Rih National University, 11, Vitaliy Matusevych Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies of power quality indicators in the power supply system of an underground iron ore mine when planning the development of a smart grid. Measurements were taken using specialised equipment at points in the power grid with voltage levels of 6 and 0.4 kV. Key power quality indicators were analysed, such as voltage deviation, total harmonic distortion of current and voltage, and frequency deviation. It was found that in the 6 kV network, the voltage drop is within the maximum permissible level (+/-10 %). In the part of the power grid with a voltage level of 0.4 kV, critical voltage deviations occur that exceed the standardised limit. The total coefficient of harmonic distortion of voltage and current, as well as the frequency, are within normal limits here. Based on the data obtained, a systemic nature of voltage quality problems was identified in the nodes of the underground mine's power supply system located far from the surface. This requires a detailed technical audit of the condition of cable lines and transformers, as well as an assessment of the possibility of using specialised means of compensating for voltage drops (e.g. dynamic voltage restorers, static compensators, etc.). Such measures are necessary to ensure stable and reliable power supply in the context of developing a smart power grid for an underground iron ore enterprise, which is crucial for ensuring reliable power supply to underground power receivers and improving the competitiveness of mining production.

Keywords: Smart grid; underground iron ore mine; power quality; statistical analysis