

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-48-57>

УДК 621.316.11.3:621.311.1

ВЛАСЮК Валентин

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3202-8967>

[Email\\_Valentin@ua.fm](mailto:Email_Valentin@ua.fm)

## ПОБУДОВА ПРОГНОЗОВАНИХ МОДЕЛЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТРАДИЦІЙНИХ ТА СКЛАДЕНИХ ЗГІДНО З КОНЦЕПЦІЄЮ SMART GRID СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

У роботі досліджено особливості побудови прогнозованих моделей споживання електроенергії згідно з традиційними та розглянуто схеми, побудовані за концепцією Smart Grid, а також швидкоплинність зміни режиму споживання електроенергії, що є хаотично лавиноподібною та формує відповідний ряд проблемних питань. Потребує у сьогоднішні вирішення, в першу чергу, систематизація об'ємів споживання електроенергії на залізорудній шахті. Розглянута дана проблема є актуальною не тільки з точки зору зниження нерівномірності у об'ємах споживаної електроенергії залізорудною шахтою, а й дозволить підвищити ефективність використання спожитої енергії, що, у свою чергу, дозволить збільшити об'єми виробленої продукції (залізорудної сировини).

Прогнозованість моделей споживання електроенергії здійснюється за допомогою виділення даних зв'язків між даними змінними за статистично-математичним методом множинної кореляції, оскільки на прогнозовану модель споживання електроенергії чинить вплив велика кількість факторів.

Основоположенням для побудови прогнозованих моделей споживання для традиційних схем електропостачання та подальшої їх трансформації стають «інтелектуальні технології» розвитку електроенергетики. Впровадження «інтелектуальних технологій», у тому числі й Smart Grid, дозволить стабілізувати та спрогнозувати графіки для об'ємів спожитої електроенергії залізорудної шахти, на відміну від традиційних схем її електропостачання.

Ціль даної роботи полягає у дослідженні питань особливостей побудови математичних прогнозованих моделей споживання електроенергії, котрі розробляються для традиційних та побудованих згідно з концепцією Smart Grid схем електропостачання та сприяють збільшенню об'ємів виробленої продукції (залізорудної сировини) та зниження собівартості їх видобутку для конкурування по якості та ціні з іноземними виробниками сировини українських залізорудних шахт.

Ключові слова: модель споживання електроенергії, схеми електропостачання, концепція Smart Grid, математична модель, залізорудна шахта.

VLASYUK Valentyn  
Kryvyi Roh National University

## BUILDING PREDICTIVE ELECTRICITY CONSUMPTION MODELS FOR TRADITIONAL AND SMART GRID POWER SUPPLY SCHEMES FOR IRON ORE MINES

The paper studies the peculiarities of building predictive models of electricity consumption according to the traditional and considered schemes built on the concept of Smart Grid, as well as the rapidity of changes in the mode of electricity consumption, chaotic - avalanche-like and forms a corresponding series of problematic issues. Need to be solved today: first of all - systematization of electricity consumption volumes at the iron ore mine. This problem is relevant not only in terms of reducing the irregularity in the amount of electricity consumed by the iron ore mine, but also will increase the efficiency of energy consumption, which in turn will increase the volume of products (iron ore raw materials).

Predictability of electricity consumption models is carried out by isolating these relationships between these variables by statistical - mathematical method of multiple correlation, as the predicted model of electricity consumption is influenced by a large number of factors. The basis for the construction of predictive consumption models for traditional power supply schemes and their subsequent transformation are "smart technologies" of power industry development. The introduction of "smart technologies" including Smart Grid will allow to stabilize and predict the schedules for the volume of consumed electricity of iron ore mine, in contrast to the traditional schemes of its power supply. The purpose of this work is to investigate the issues of construction of mathematical predictive models of electricity consumption developed for traditional and built according to the concept of Smart Grid power supply schemes and contributing to increase the volume of production (iron ore raw materials) and reduce the cost of their production to compete in quality and price. with foreign producers of raw materials of Ukrainian iron ore mines

Keywords: power consumption model, power supply schemes, Smart Grid concept, mathematical model, iron ore mine.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із пріоритетних напрямків розвитку електроенергетики як галузі є забезпечення та мінімізація нерівномірного об'єму споживання електроенергії для типових схем електропостачання залізорудної шахти. Забезпечення реалізації даного пріоритетного напрямку є важливим аспектом для усієї енергетичної сфери та дозволить розширити класичні мережеві структури на основі введення у експлуатацію нових «інтелектуальних технологій»: Smart Grid.

Побудова прогнозованих моделей споживання електроенергії є першочерговим перспективним напрямком у галузі «Електроенергетика». Причиною для побудови прогнозованих моделей споживання традиційних схем електропостачання та подальшої їх трансформації з втіленням концепції Smart Grid обумовлено: швидкоплинністю зміни режимів споживання електроенергії за хаотично лавиноподібним графіком. Аналіз схемотехнічних рішень раніше створених та практично реалізованих систем

електропостачання у даному випадку фізично не можливо реалізувати систематизацію об'ємів спожитої електроенергії залізрудною шахтою. Тому, реалізацію даного завдання слід покласти на «інтелектуальні технології» розвитку електроенергетики. Впровадження «інтелектуальних технологій» у тому числі й Smart Grid дозволить стабілізувати графіки об'ємів спожитої електроенергії залізрудної шахти, на відміну від традиційних схем її електропостачання [1–7].

### Аналіз досліджень та публікацій

Побудові прогнозованих моделей споживання електроенергії на залізрудній шахті у сьогоденні присвячена ціла низка публікацій. Однак дані публікації не наводять досить детальних положень у методологію побудови даних прогнозованих моделей споживання електроенергії. Слід відмітити, що вони не дозволяють досить повно відобразити графічну характеристику прогнозованої моделі споживання залізрудною шахтою. У роботах [9–12] було показано наступне: розв'язані задачі та розглянуті аспекти з використанням різноманітних способів штучних нейронних мереж, прогнозування у системах електроживлення локальних об'єктів на основі методу короткострокового прогнозування діапазону зміни оптових та ринкових цін на електроенергію, а також прогнозування рівнів та об'ємів електроспоживання локальних об'єктів на основі математичного методу вейвлет перетворення; проведено аналіз особливостей прогнозування рівнів електроспоживання для умов залізрудних підприємств та впровадження розподільчих електромереж з відновлювальними джерелами електроенергії та процесів електроспоживання для електроприймачів підприємств даної галузі; обґрунтована необхідність врахувати причинно-наслідкові зв'язки для процесу моделювання електроспоживання для складних виробничих систем.

Запропонована двоетапна процедура для побудови математичної моделі електроспоживання згідно з методологією латентних змінних, що не забезпечують наявні причинно-наслідкові зв'язки. Для першого етапу передбачається формування математичного відображення залежностей між латентними факторами та інформативними показниками енергоефективності інформаційного поля, а також перевірку їх відповідності вихідним даним. На другому етапі будується математична модель електроспоживання, як рівняння регресії на головних компонентах, що відображають латентні фактори та перевірка її адекватності функціонування. На основі запропонованої процедури проведено моделювання електроспоживання системи комунального водопостачання з урахуванням побудови математичних залежностей для попередньо виявлених латентних факторів і виконано перевірку її адекватності та точності прогнозування електроспоживання; розв'язана актуальна науково прикладна задача планування по впровадженню у функціонування енергоефективних режимів роботи електротехнічних комплексів вугільних шахт, розвитку та удосконалення їх математичних моделей та методів багатфакторного прогнозування рівнів електроспоживання з урахуванням певних технологічних характеристик; запропоновано методику використання багатфакторної регресійної моделі прогнозування обсягів споживаної електроенергії для світлосигнального обладнання аеропорту для ефективного використання енергетичних ресурсів авіапідприємств. Практичне використання даної моделі дозволяє розробити комплекс енергозберігальних заходів, з точним врахуванням планів проведення реконструювання наявної інфраструктури та керувати споживанням електроенергії для світлосигнального обладнання враховуючи особливості його експлуатації.

### Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження та аналіз з питань по особливостям побудови математичних прогнозованих моделей споживання електроенергії, котрі були розроблені для традиційних та побудованих згідно концепції Smart Grid схем електропостачання та сприяють не тільки вирішенню проблеми хаотично лавиноподібного режиму її споживання, але й підвищення ефективності використання, що полягає у збільшенні об'ємів виробленої продукції (залізрудної сировини).

Впровадження даної технології дозволить виконати стабілізування графіків та об'ємів спожитої електроенергії для залізрудної шахти, на відміну від підходу характерного для традиційних схем її електропостачання, що дозволить перенаправити залишок її обсягів на інші схеми електропостачання де є недостатнім для нормального функціонування енергосистеми залізрудної шахти.

### Виклад основного матеріалу

В сьогоденні побудова прогнозованих математичних моделей споживання електроенергії є не достатньо чітко структурованою, а є скоріше недопрацьованою. Для удосконалення їх побудови необхідно володіти певними обсягами: первинної інформації від операторів енергодиспетчерського відділу, або структурного підрозділу підприємств гірничо-металургійного циклу виробництва. В даному аспекті вирішення цієї проблеми є досить складною задачею, оскільки подекуди просто відсутній деякий обсяг інформації про спожитий об'єм електроенергії. В такому разі, доводиться послуговуватися певними математичними методами.

Візьмемо за приклад основу дані від об'єднання підприємств ПАТ «КЗРК» (Криворізького залізрудного комбінату). У табл. 1 наведені показники споживання електроенергії для даного об'єднання підприємств:

Табл. 1

**Питомі показники споживання електроенергії на одиницю виготовленої продукції ПАТ «КЗРК» за період 2010–2014 років**

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2010	Електроенергія	тис. кВт·год	42578	62841	38278	39753
		кВа	5245	9136	7001	7381
2011	Електроенергія	тис. кВт·год	43808	66385	41034	4225
		кВа	4616	9713	8228	8375
2012	Електроенергія	тис. кВт·год	46546	70502	44219	42102
		кВа	6552	7440	4357	7743
2013	Електроенергія	тис. кВт·год	42977	68458	41181	41229
		кВа	6619	6692	10891	7637
2014	Електроенергія	тис. кВт·год	41829	68037	43545	42161
		кВа	6180	7190	7844	9874

На основі наведеної вище табл. 1, де показано зведені рівні споживання ЕЕ (за період 2010–2014 року) вітчизняних залізрудних підприємств, котрі характеризуються підземним видобутком залізрудної сировини.

Значення коефіцієнту  $m_n$ , що знаходяться у табл. 2 визначаються за емпіричною залежністю (з табл. 1):

$$m_n = 0,035 \frac{Q_n}{P_n} \tag{1}$$

де  $P_n$  та  $Q_n$  – відповідно активна та реактивна потужності річна.

Для виконання подальшого кроку побудови прогнозованої моделі застосуємо з табл. 2 річні коефіцієнти споживання електроенергії для кожної з залізрудних шахт.

Таблиця 2

**Річні коефіцієнти споживання електроенергії для залізрудних шахт**

Місяць	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
Січень	1,034	0,966	1,015	1,006
Лютий	1,024	1,03	0,997	0,973
Березень	1,004	1,032	1,017	1,023
Квітень	0,934	0,971	0,996	0,922
Травень	0,98	1,034	0,946	0,96
Червень	0,941	1,006	1,022	1,063
Липер	1,015	0,956	1	0,948
Серпень	0,972	1,002	0,984	0,935
Вересень	1,026	0,977	0,97	1,016
Жовтень	0,964	0,986	1,018	1,025
Листопад	1,016	0,962	1,008	1,034
Грудень	1,091	1,078	1,028	1,096

Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки, що у табл. 4 було отримано за співвідношеннями для кожного з років:

$$P = \left(0,035 \frac{Q_n}{P_n}\right) \cdot P_n \tag{2}$$

$$Q = \left(0,035 \frac{Q_n}{P_n}\right) \cdot P_n \tag{3}$$

Отримані значення рівнів споживання для активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт занесемо у Табл. 4:

Таблиця 3

**Значення розрахункового коефіцієнту  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт**

Рік	$m_n$	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015		1,034	0,966	1,015	1,006
2016		1,007	1,032	0,995	1,023
2017		0,938	0,971	0,946	1,096
2018		0,934	1,034	1,022	1,063
2019		0,98	1,006	1	0,924
2020		0,972	0,956	0,97	0,96
2021		1,026	1,002	1,018	0,935
2022		0,964	0,986	1,009	0,948
2023		1,016	0,961	1,028	1,021
2024		1,091	1,085	0,984	0,917

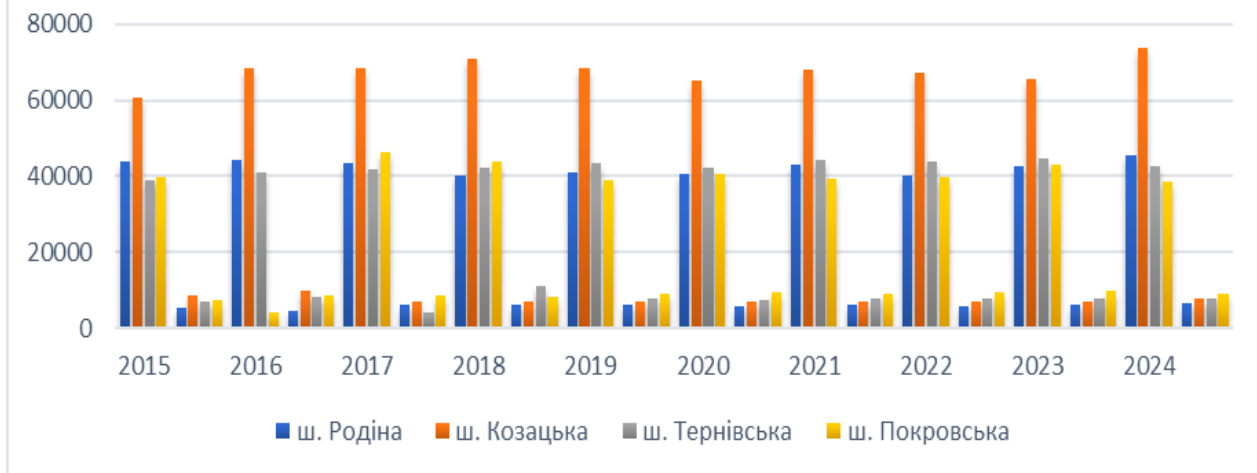
Таблиця 4

**Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для традиційних схем електропостачання для залізрудних шахт**

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015	Електроенергія	тис. кВт·год	38780,652	61252,566	37241,94	38884,368
		кВа	4777,221094	8905,069031	6811,505876	7219,719775
2016	Електроенергія	тис. кВт·год	39498,656	67644,863	41857,33	41965,5
		кВа	4161,929239	9309,384174	8393,091369	8318,60503
2017	Електроенергія	тис. кВт·год	50212,148	75897,442	37474,174	44982,342
		кВа	7068,061567	8009,375173	3692,416747	8272,725146
2018	Електроенергія	тис. кВт·год	46759,518	64093,572	41542,432	42680,877
		кВа	7201,555475	6265,362468	10986,5867	7905,936541
2019	Електроенергія	тис. кВт·год	34812,42	63052,722	42929,246	40437,864
		кВа	5143,339683	6663,272501	7733,08085	9470,445889
2020	Електроенергія	тис. кВт·год	47236,13031	67371,02266	41238,83953	39391,80693
		кВа	5818,814962	9794,58734	7542,533976	7313,936732
2021	Електроенергія	тис. кВт·год	37626,52984	73617,88219	36565,70216	40809,86935
		кВа	3964,665398	10771,26594	3602,902922	8089,530315
2022	Електроенергія	тис. кВт·год	52376,12176	77240,15278	39894,59886	41051,87896
		кВа	7372,671117	8151,069994	10550,78983	7549,871712
2023	Електроенергія	тис. кВт·год	40334,6428	75458,88261	40087,51774	41771,0664
		кВа	6212,043668	7376,359847	7221,184733	9782,678534
2024	Електроенергія	тис. кВт·год	43169,33269	64090,65447	39212,33943	39768,35
		кВа	6378,026633	6772,958914	7862,726734	7883,075296

На основі наведеної вище складеної прогнозованої моделі споживання електроенергії для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт (Табл. 1–4, Формули 1–3) побудуємо графічну залежність від коефіцієнту  $m_n$ :

## Прогнозована модель споживання електроенергії на залізрудних шахтах на 2015 - 2024 рік



**Рис. 1.** Прогнозована модель споживання електроенергії для традиційних схем електропостачання для залізрудних шахт на 2015–2024 рік

Згідно з отриманою прогнозованою моделлю (рис. 1), слід відмітити максимальне відхилення споживання ЕЕ за період десяти років (з 2015–2024 рік) носить коливальний характер у межах 25–45%, а максимальні рівні споживання ЕЕ ставляться у відповідність найбільшим за об’ємом видобутку залізрудної сировини, але дане логічне заключення може не відповідати дійсності для умов мінімального об’єму видобутку ЗРС (залізрудної сировини).

Згідно концепції SG (Smart Grid), враховуємо вдосконалені розрахункові дані електричних параметрів та наведених графіків, котрі були отримані у раніш наведеному рис. 1 для топології схем вітчизняних залізрудних підприємств – створення відповідної математичної моделі.

Тобто, використовуємо наступні скориговані та удосконалені розрахункові формули основних параметрів у математичній моделі:

$$P_k = m_n \cdot (m_n - \Delta m_y) \cdot P_n \tag{4}$$

$$Q_k = m_n \cdot (m_n - \Delta m_x) \cdot Q_n \tag{5}$$

де  $m_n$  – певний розрахунковий коефіцієнт;  $\Delta m_y$  та  $\Delta m_x$  – зміни у розрахункових коефіцієнтах з урахуванням змін схемної топології згідно з концепцією Smart Grid;  $P_k$  та  $Q_k$  – відповідно активна та реактивна потужності річна для схемної топології згідно з концепцією Smart Grid.

Таблиця 5

### Розрахункові коефіцієнти $\Delta m_y$ для залізрудних шахт для ПАТ «КЗРК» за період 2015–2024 років прогнозна модель Smart Grid

Роки	Коефіцієнт ш. Родіна	Коефіцієнт ш. Козацька	Коефіцієнт ш. Тернівська	Коефіцієнт ш. Покровська
2015	0,123185683	0,145382791	0,182898793	0,185671522
2016	0,105368882	0,146313173	0,200516645	0,198224852
2017	0,140763975	0,105528921	0,098532305	0,183910503
2018	0,154012611	0,097753367	0,264466623	0,185233695
2019	0,147744388	0,105677793	0,180135492	0,234197481
2020	0,137402281	0,116087056	0,107350946	0,222487607
2021	0,167103683	0,106953562	0,22479663	0,206093783
2022	0,161255054	0,109573924	0,160950938	0,180384615
2023	0,154966107	0,141265369	0,107400213	0,201657867
2024	0,168448159	0,143002933	0,113575725	0,202189349

Для виконання подальшого кроку побудови прогнозованої моделі застосуємо у табл. 5 розрахункові коефіцієнти на прогнозовану модель споживання електроенергії:

Проведемо перерахунок розрахункових коефіцієнтів  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ

на 2015–2024 роки для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт, враховуючи скориговані та удосконалені розрахункові формули (4, 5) для основних параметрів у математичній моделі:

Занесемо отримані розрахункові коефіцієнти за формулами 4 та 5  $m_n$  у табл. 6.

Таблиця 6

**Розрахунковий коефіцієнт  $m_n$  на прогнозовану модель споживання ЕЕ на 2015–2024 роки для схем електропостачання складених згідно з концепцією Smart Grid для залізрудних шахт**

Рік	$m_n$	ш. Родіна	ш. Козацька	ш. Тернівська	ш. Покровська
2015		0,911	0,975	0,973	0,978
2016		0,902	1,019	1,020	0,993
2017		1,079	1,076	0,847	1,068
2018		1,088	0,936	1,009	1,035
2019		0,832	0,927	0,986	0,959
2020		1,109	1,072	1,077	0,991
2021		0,859	1,109	0,827	0,966
2022		1,125	1,095	0,969	0,975
2023		0,938	1,102	0,920	0,991
2024		1,032	0,942	0,956	0,941

Результати отримані за математичними формулами 4 та 5 заносимо у табл. 7:

Таблиця 7

**Значення рівнів споживання активної та реактивної потужності для прогнозованої моделі споживання ЕЕ на 2015–2024 роки та схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт**

Рік	Продукція	Одиниці виміру	ш. Октябрська	ш. Батьківщина	ш. Гвардійська	ш. Леніна
2015	Електроенергія	тис. кВт·год	38780,652	61252,566	37241,94	38884,368
		кВа	4777,221094	8905,069031	6811,505876	7219,719775
2016	Електроенергія	тис. кВт·год	39498,656	67644,863	41857,33	41965,5
		кВа	4161,929239	9309,384174	8393,091369	8318,60503
2017	Електроенергія	тис. кВт·год	50212,148	75897,442	37474,174	44982,342
		кВа	7068,061567	8009,375173	3692,416747	8272,725146
2018	Електроенергія	тис. кВт·год	46759,518	64093,572	41542,432	42680,877
		кВа	7201,555475	6265,362468	10986,5867	7905,936541
2019	Електроенергія	тис. кВт·год	34812,42	63052,722	42929,246	40437,864
		кВа	5143,339683	6663,272501	7733,08085	9470,445889
2020	Електроенергія	тис. кВт·год	47236,13031	67371,02266	41238,83953	39391,80693
		кВа	5818,814962	9794,58734	7542,533976	7313,936732
2021	Електроенергія	тис. кВт·год	37626,52984	73617,88219	36565,70216	40809,86935
		кВа	3964,665398	10771,26594	3602,902922	8089,530315
2022	Електроенергія	тис. кВт·год	52376,12176	77240,15278	39894,59886	41051,87896
		кВа	7372,671117	8151,069994	10550,78983	7549,871712
2023	Електроенергія	тис. кВт·год	40334,6428	75458,88261	40087,51774	41771,0664
		кВа	6212,043668	7376,359847	7221,184733	9782,678534
2024	Електроенергія	тис. кВт·год	43169,33269	64090,65447	39212,33943	39768,35
		кВа	6378,026633	6772,958914	7862,726734	7883,075296

На основі скоригованої, прогнозованої моделі споживання електроенергії для схем електропостачання складених, згідно концепції Smart Grid у залізрудних шахт (табл. 4–7, Формули 4 та 5) будуюмо дану графічну залежність від коефіцієнту  $m_n$  :



Рис. 2. Прогнозована модель споживання електроенергії для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для залізрудних шахт на 2015–2024 рік

Провівши вимірювання тісноти кореляційного зв'язку між рівнями споживання активної та реактивної потужності для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання на залізрудних шахтах. Виділення даних зв'язків між даними змінними виконаємо методом множинної кореляції, оскільки на прогнозовану модель споживання електроенергії чинить вплив велика кількість факторів (мінімум 5).

Для кожного з рівнянь наведених вище параметри та змінні позначаються наступним чином:  $x$  – незалежна змінна,  $y$  – залежна від величини  $x$  змінна та ставиться у відповідність кожній з потужностей: активної ( $P$ , кВт), реактивної ( $Q$ , кВар).

Проведемо аналіз отриманих рівнянь регресії для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання та дослідимо їх окремо один від одного:

Рівняння  $y=0,0781x^2+0,1607x-154,75$  та  $R^2=0,307$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $P$ , кВт для ш. Родіна.

Рівняння  $y=0,03x^2-0,9243x-58,554$  та  $R^2=0,2319$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0044x^2-0,3843x-58,554$  та  $R^2=0,01$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,03x^2+0,159x+23,522$  та  $R^2=0,0577$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Покровська.

Рівняння  $y=7,6285x^2+0,1607x-12904$  та  $R^2=0,0508$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Родіна

Рівняння  $y=-22,582x^2-0,3843x-43046$  та  $R^2=0,1652$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню реактивної потужності  $Q$ , кВар для ш. Козацька

Рівняння  $y=-5,9744x^2+0,159x-9520$  та  $R^2=0,0793$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $Q$ , кВар для ш. Тернівська

Рівняння  $y=-29,875x^2-0,1607x+6203$  та  $R^2=0,3205$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Покровська.

Таким чином для даних рівнянь для активної потужності  $P$  для кожної з вищенаведених шахт маємо наступні кореляційні зв'язки:  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – даний зв'язок середньої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили.

Реактивна потужність показує кореляційний зв'язок наступним чином:  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок є слабкої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – даний зв'язок середньої сили.

Рівняння:  $y=0,0781x^2+0,1607x-154,75$ ,  $y=0,03x^2-0,9243x-58,554$ ,  $y=-0,0044x^2-0,3843x-58,554$ ,  $0,03x^2+0,159x+23,522$ ,  $y=7,6285x^2+0,1607x-12904$ ,  $y=-22,582x^2-0,3843x-43046$ ,  $y=-5,9744x^2+0,159x-9520$ ,  $y=-29,875x^2-0,1607x+6203$  є зведеними рівняннями регресії для динамічних змін потужностей активної, реактивної для традиційних схем електропостачання для ДПП залізрудних шахт на 2015–2024 рік, а значення:  $R^2=0,307$ ,  $R^2=0,2319$ ,  $R^2=0,01$ ,  $R^2=0,0577$ ,  $R^2=0,0508$ ,  $R^2=0,1652$ ,  $R^2=0,0793$ ,  $R^2=0,3205$  є зведеними коефіцієнтами кореляції для послідовності шахтних назв наведених вище.

Рівняння  $y=-0,035x^2+0,1607x-154,75$  та  $R^2=0,5945$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $P$ , кВт для ш. Родіна.

Рівняння  $y=-0,9243x^2-0,9243x-58,554$  та  $R^2=0,579$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0026x^2-0,3843x-58,554$  та  $R^2=0,4917$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,0903x^2+0,159x+23,522$  та  $R^2=0,3137$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $P$ , кВт для ш. Покровська.

Рівняння  $y=-15,479x^2+0,1607+33860x$  та  $R^2=0,2376$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Родіна

Рівняння  $y=-0,9243x^2+0,3843x-32173$  та  $R^2=0,0359$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню реактивної потужності  $Q$ , кВар для ш. Козацька.

Рівняння  $y=-0,0026x^2-0,159x-43046$  та  $R^2=0,1652$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню повної потужності  $Q$ , кВар для ш. Тернівська.

Рівняння  $y=-0,0352x^2-0,1607x+24172$  та  $R^2=0,028$  – дане рівняння та коефіцієнт кореляції відповідають значенню активної потужності  $Q$ , кВар для ш. Покровська.

Дані рівняння для схем електропостачання складених згідно концепції Smart Grid для даних залізрудних шахт для активної та реактивної  $P$  та  $Q$  показують наступні результати по силам кореляційних зв'язків:  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0,3 < R^2 \leq 0,7$  – зв'язок середньої сили;  $0 < R^2 \leq 0,3$  – зв'язок слабкої сили.

Рівняння:  $y=-0,035x^2+0,1607x-154,75$ ,  $y=-0,9243x^2-0,9243x-58,554$ ,  $y=-0,0026x^2-0,3843x-58,554$ ,  $y=-0,0903x^2+0,159x+23,522$ ,  $y=-15,479x^2+0,1607+33860x$ ,  $y=-0,9243x^2+0,3843x-32173$ ,  $y=-0,0026x^2-0,159x-43046$ ,  $y=-0,0352x^2-0,1607x+24172$ , а значення:  $R^2=0,5945$ ,  $R^2=0,579$ ,  $R^2=0,4917$ ,  $R^2=0,3137$ ,  $R^2=0,2376$ ,  $R^2=0,0359$ ,  $R^2=0,1652$ ,  $R^2=0,028$  є зведеними коефіцієнтами кореляції для послідовності шахтних назв наведених вище.

Дані рівняння для прогнозованих моделей для традиційних та побудованих згідно концепції Smart Grid схем електропостачання показують адекватність їх функціонування, оскільки:

Зв'язок слабкої сили на даних 3 залізрудних шахтах та 1 середньої сили з традиційними схемами електропостачання – пояснюється досить великою кількістю факторів впливу на прогнозовану модель споживання, де серед основних факторів впливу: зовнішнє середовище, запиленість, загазованість, механічне зношення видобувного обладнання і т. п.

Зв'язок середньої сили на даних 3 залізрудних шахтах та 1 слабкої сили з схемами електропостачання складених згідно з концепцією Smart Grid – пояснюється досить великою кількістю факторів впливу на прогнозовану модель споживання електроенергії.

Порівнюючи між собою значення розрахунку електричних параметрів розрахованих за прогнозованими моделями споживання для традиційних схем електропостачання та складених згідно концепції Smart Grid (табл. 7), приходимо до висновку: впровадження даної технології дозволяє зменшити обсяги споживання електроенергії в середньому на 5–19% у порівнянні з дещо меншим збільшенням обсягів споживання для традиційних схем електропостачання на 2–6%, що, у свою чергу, може знизити показник ефективності видобутку ЗРС т/кВт·год [13–23].

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі досліджено питання особливостей побудови прогнозованих моделей споживання електроенергії згідно з традиційними, а також схемами побудованими згідно концепції Smart Grid. У результаті проведеної побудови прогнозованих моделей споживання ЕЕ для традиційних та складених згідно концепції Smart Grid схем електропостачання дозволив, виявити наступні закономірності:

- 1) максимальні рівні споживання ЕЕ ставляться у відповідність найбільшим об'ємам видобутку ЗРС;
- 2) чим більшими є втрати енергетичної складової, тим меншими є об'єми видобутку ЗРС або між ними відсутній взаємозв'язок;
- 3) зміни видобутку об'ємів ЗРС для кожної з шахт носить коливальний характер та змінюється у межах 15–35% та залежить від зведених розрахункових коефіцієнтів прогнозних моделей;
- 4) впровадження концепції Smart Grid зменшить обсяги споживання ЕЕ у середньому на 5–19%, порівняно із збільшення даних обсягів на 2–6% для традиційних схем електропостачання залізрудних шахт;
- 5) зменшення обсягів споживання ЕЕ для концепції Smart Grid дасть підвищення об'ємів видобутку ЗРС для кожної з шахт у межах 10–20% від зведеного коефіцієнту прогнозованих моделей;
- 6) втілення у життя концепції Smart Grid дозволить здійснити зниження рівнів мінімальної вартості сировини на 10–15%, а максимальних рівнів теж знизити але усього на 2–5%.

Впровадження інтелектуальної технології Smart Grid дозволить збільшити видобуток ЗРС, а також знизити час на його перероблення та вартості готового електрообладнання на проектування нових навантажень на енергосистему, а також втілення у гірничо-металургійну галузь інтелектуальну електричну мережу з керованими автоматизованими пристроями у режимі реального часу застосовуючи технології бездротового зв'язку дозволить виключити з даного процесу вплив помилок спричиненими людським фактором.



Перспективність розвитку даного напрямку полягає у розширенні успішного досвіду експлуатації систем електропостачання, згідно з концепцією Smart Grid на залізрудних шахтах, а також удосконалення традиційних схем електропостачання вугільних шахт, що дозволить значно знизити час та вартість готового електрообладнання при проектуванні нових навантажень на енергосистему, а також втілити у життя інтелектуальну електричну мережу з керованими автоматизованими пристроями у режимі реального часу на території України та інших зарубіжних країн.

### Література

1. World Energy Issues Monitor 2017, Exposing the new energy realities, World Energy Council. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>.
2. Форсайт економіки України: середньостроковий (2015–2020 роки) і довгостроковий (2020–2030 роки) часові горизонти (версія для обговорення). Київ : НТУУ "КПІ", 2015. 36 с.
3. Recommendations for smart grid standardization in Europe/CEN/CENELEC/ETSI Joint Presidents Group (JPG). 2011. URL: <https://www.etsi.org/e-brochure/smartgrids/data/catalogue.pdf> (18.11.2022).
4. Олійник Д. «Розумна енергетика»: світові тенденції й вітчизняні реалії. Віче. 2015. № 21. С. 46–48.
5. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці. 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-Smart-Grid.pdf> (18.11.2022).
6. План розвитку системи передачі на 2020–2029 роки : проект. ДП «НЕК «Укренерго». 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/ПРОЕКТ-Planu-rozvytku-systemy-peredachi-na-2019-2028-roky.pdf> (10.11.2022).
7. Стогній Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. Технічна електродинаміка. 2012. № 5. С. 52–67.
8. Петергеря Ю.С., Хижняк Т.А., Блінов І.В., Чопик В.В. Розв'язання задач прогнозування в системах електроживлення локальних об'єктів з використанням штучних нейронних мереж, 2010, с. 29–36.
9. Бойко С.М., Сінчук І.О., Сіноліцій А.П., Несмашний Є.О., Дозоренко О.В. Особливості прогнозування рівнів енергоспоживання в умовах розподілених електричних мереж залізрудних підприємств. Гірничий вісник «КНУ», 2019, Вип. 105, с. 24–29.
10. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання у складних виробничих системах з урахуванням латентних взаємозв'язків у сукупності показників енергоефективності. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 2014, Випуск 2 (85), с. 40–46.
11. Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Бандура І.О. Багатофакторне прогнозування споживання електротехнічних комплексів вугільних шахт для планування їхніх енергоефективних режимів. Наукові праці ВНТУ, 2014, Вип. 2, с. 1–9.
12. Лещинський О.Л., Коновалюк В.С., Соколова Н.П. Модель прогнозування обсягу споживання електричної енергії світлосигнального аеропорту. TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, 2014, Вип. 2/1 (16), с. 27–31.
13. Липовик В.В., Максимов О.В. Математичний аналіз : навчальний посібник. Кривий Ріг: 2010. 196 с. ISBN 978–966–2915–97-6.
14. Качан Ю.Г., Дьяченко В.В. Методические основы повышения энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий. Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. Дніпропетровськ : НГУ, 2006. Вип.76. С. 12–17. ISSN 0201 – 7814.
15. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Віннік М.А., Ялова А.М. Система чинників формування факторного простору і процес споживання електричної енергії залізрудними підприємствами. Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук : КрНУ, 2015. Вип. 1/2015 (29). С. 110–117. ISSN 2072 – 2052, ISSN 2074 – 9937.
16. Соловей О.І., Ситник О.О., Розен В.П. Техніко-економічні розрахунки систем електропостачання промислових підприємств. Черкаси : ЧДТУ, 2012. 251 с.
17. Праховник А.В., Тесик Ю.Ф., Новський В.О., Гриб О.Г., ... Светелік О.Д. Автоматизована система обліку електричної енергії з контролем показників якості / Інститут електродинаміки; Національна академія наук України. Київ. 2012. URL: <https://refdb.ru/look/2805705.html>
18. Шулле Ю.А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з врахуванням їх фронтальних властивостей : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук. Вінниця, 2013. 21 с.
19. Жуковская В.М., Мучник И.Б. Факторный анализ в социально-экономических исследованиях. М. : Статистика, 1976. 152 с. ISBN 5-279-02933-5.
20. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London, Springer, 2017, 198 p.
21. Власюк В.П. (2022). Керування режимами споживання електроенергії дільничними підземними підстанціями залізрудних шахт [неопублікована дисертація на здобуття ступеня доктора філософії]. Криворізький національний університет.

22. Липовик В.В., Максимов О.В. Математичний аналіз : навчальний посібник. Кривий Ріг : 2010. 197 с. ISBN 978 – 966 – 2915 – 97 – 6.
23. Липовик В.В. Вища математика : навчальний посібник. Кривий Ріг, 2010, 283 с. ISBN 966 – 7388 – 58 – 1.

## References

1. World Energy Issues Monitor 2017, Exposing the new energy realities, World Energy Council. URL: <https://www.worldenergy.org/publications/2017/world-energy-issues-monitor-2017/>.
2. Forsait ekonomiky Ukrainy: serednostrokovyi (2015–2020 roky) i dovhostrokovyi (2020–2030 roky) chasovi horizonty (versiiia dlia obhovorennia). Kyiv : NTUU "KPI", 2015. 36 s.
3. Recommendations for smart grid standardization in Europe/CEN/CENELEC/ETSI Joint Presidents Group (JPG). 2011. URL: <https://www.etsi.org/e-brochure/smartgrids/data/catalogue.pdf> (18.11.2022).
4. Oliinyk D. «Rozumna enerhetyka»: svitovi tendentsii y vitchyzniani realii. Viche. 2015. № 21. S. 46-48.
5. Otsinka stanu ta realizatsii kontseptsii rozvytku «intelektualnykh» elektromerezh u svitovii praktytsi. 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-Smart-Grid.pdf> (18.11.2022).
6. Plan rozvytku systemy peredachi na 2020–2029 roky : proekt. DP «NEK «Ukrenerho». 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/PROEKT-Planu-rozvytku-systemy-peredachi-na-2019-2028-roky.pdf> (10.11.2022).
7. Stohniy B. S. Evoliutsiia intelektualnykh elektrychnykh merezh ta yikhni perspektyvy v Ukraini. Tekhnichna elektrodynamika. 2012. № 5. S. 52–67.
8. Peterheria Yu.S., Khyzhniak T.A., Blinov I.V., Chopyk V.V. Rozviazannia zadach prohnozuvannia v systemakh elektrozhvylennia lokalnykh ob'ektiv z vykorystanniam shchuchnykh neironnykh merezh, 2010, s. 29–36.
9. Boiko S.M., Sinchuk I.O., Sinolitsyi A.P., Nesmashnyi Ye.O., Dozorenko O.V. Osoblyvosti prohnozuvannia rivniv enerhospozhyvannia v umovakh rozpodilchykh elektrychnykh merezh zalizorudnykh pidpriemstv. Himychni visnyk «KNU», 2019, Vyp. 105, s. 24–29.
10. Davydenko L.V., Davydenko V.A. Modeliuvannia elektrospozhyvannia u skladnykh vyrobnychkykh systemakh z urakhuvanniam latentnykh vzaiemozviakiv u sukupnosti pokaznykiv enerhoefektyvnosti. Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2014, Vypusk 2 (85), s. 40–46.
11. Dobrovolska L.N., Volynets V.I., Bandura I.O. Bahatofaktorne prohnozuvannia spozhyvannia elektrotekhnichnykh kompleksiv vuhilnykh shakht dlia planuvannia yikhnykh enerhoefektyvnykh rezhymiv. Naukovi pratsi VNTU, 2014, Vyp. 2, s. 1–9.
12. Leshchynskiy O.L., Konovaliuk V.S., Sokolova N.P. Model prohnozuvannia obsiahu spozhyvannia elektrychnoi enerhii svitlosyhnalnoho aeroportu. TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES, 2014, Vyp. 2/1 (16), s. 27–31.
13. Lypovyk V.V., Maksymov O.V. Matematychni analiz : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih: 2010. 196 s. ISBN 978–966–2915–97–6.
14. Kachan Yu.H., Diachenko V.V. Metodicheskiye osnovy povysheniya enrhoefektyvnosti systemy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka : nauk.-tekhn. zb. Dnipropetrovsk : NHU, 2006. Vyp.76. S. 12–17. ISSN 0201 – 7814.
15. Sinchuk O.M., Sinchuk I.O., Vinnik M.A., Yalova A.M. Systema chynnykiv formuvannia faktornoho prostoru i protses spozhyvannia elektrychnoi enerhii zalizorudnymy pidpriemstvamy. Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy : shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal. Kremenchuk : KrNU, 2015. Vyp. 1/2015 (29). S. 110–117. ISSN 2072 – 2052, ISSN 2074 – 9937.
16. Solovei O.I., Sytnyk O.O., Rozen V.P. Tekhniko-ekonomichni rozrakhunky system elektropostachannia promyslovykh pidpriemstv. Cherkasy : ChDTU, 2012. 251 s.
17. Prakhovnyk A.V., Tesyk Yu.F., Novskiy V.O., Hryb O.H. ... Svetelik O.D. Avtomatyzovana systema obliku elektrychnoi enerhii z kontrolem pokaznykiv yakosti / Instytut elektrodynamiky; Natsionalna akademiia nauk Ukrainy. Kyiv. 2012. URL: <https://refdb.ru/look/2805705.html>
18. Shullie Yu.A. Operativne prohnozuvannia elektrychnykh navantazhen system elektrospozhyvannia z vrakhuvanniam yikh frontalnykh vlastyvosei : avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhn. nauk. Vinnytsia, 2013. 21 s.
19. Zhukovskaia V.M., Muchnyk Y.B. Faktorny analiz v sotsyalno-ekonomicheskyykh yssledovaniyakh. M. : Statystyka, 1976. 152 s. ISBN 5-279-02933-5.
20. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London, Springer, 2017, 198 r.
21. Vlasiuk V.P. (2022). Keruvannia rezhymamy spozhyvannia elektroenerhii dilnychnymy pidzemnymy pidstantsiiamy zalizorudnykh shakht [neopublikovana dysertatsiia na zdobuttia stupenia doktora filosofii]. Kryvorizkyi natsionalnyi universytet.
22. Lypovyk V.V., Maksymov O.V. Matematychni analiz : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih : 2010. 197 s. ISBN 978 – 966 – 2915 – 97 – 6.
23. Lypovyk V.V. Vyshcha matematika : navchalnyi posibnyk. Kryvyi Rih, 2010, 283 s. ISBN 966 – 7388 – 58 – 1.