

Ситник Олександр Олексійович, д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем, +38(067)943-49-99, sytnyk.ets@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2741-9376

Черкаський державний технологічний університет

б-р. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

Бедерак Ярослав Семенович, к.т.н., начальник лабораторії цеху електропостачання Приватного акціонерного товариства "АЗОТ", +38(096)036-66-82, yaroslav0768@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2669-0965

ПрАТ «АЗОТ»,

вул. Героїв Холодного Яру, 72, м. Черкаси, 18028, Україна

Семко Інга Борисівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехнічних систем, +38(096)410-06-91, semkoinga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6251-5830

Черкаський державний технологічний університет

б-р. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА СТАБІЛЬНОСТІ РОБОТИ ОДНОТИПНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ МЕТОДОМ ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. У статті представлено методуку оцінки ефективності та стабільності роботи чотирьох одноптипних агрегатів із виробництва слабоазотної кислоти шляхом застосування дисперсійного аналізу (ANOVA). Аналіз проводиться для виявлення відмінностей у продуктивності агрегатів, оцінки впливу експлуатаційних факторів на стабільність їх роботи та виявлення можливих аномалій у технологічному процесі. Використання дисперсійного аналізу дозволило визначити статистично значущі відхилення між агрегатами за ключовими техніко-економічними показниками, що створює основу для прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи, технічного обслуговування та підвищення загальної надійності виробничої системи. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження аналітичних методів контролю в умовах хімічного виробництва.

Ключові слова: дисперсійний аналіз, слабоазотна кислота, технологічний агрегат, ефективність, стабільність, виробництво.

Sytnyk Oleksandr, Dr Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Engineering Systems, +38(067)943-49-99, sytnyk.ets@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2741-9376

Cherkasy State Technological University

460, Shevchenko Ave., Cherkasy, 18006, Ukraine

Bederak Yaroslav, Ph. D., Head of the laboratory of the power Supply of the Private Joint-Stock Company "AZOT", +38(067)943-49-99, sytnyk.ets@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2669-0965

PJ-S Company "AZOT"

72, Str. Heroes of Kholodny Yar, Cherkasy, 18028, Ukraine

Semko Inga, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Systems, +38(096)410-06-91, semkoinga77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6251-5830

Cherkasy State Technological University

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY AND STABILITY OF THE OPERATION OF SAME-TYPE TECHNOLOGICAL UNITS USING THE METHOD OF DISPERSION ANALYSIS

Abstract. The article presents a methodology for evaluating the efficiency and stability of four identical units used in the production of weak nitric acid through the application of analysis of variance (ANOVA). The analysis aims to identify differences in unit performance, assess the impact of operational factors on process stability, and detect potential anomalies in the technological workflow. The use of ANOVA enabled the identification of statistically significant deviations among the units based on key technical and economic indicators, providing a foundation for decisions on optimizing operating modes, maintenance strategies, and improving the overall reliability of the production system. The findings confirm the relevance of implementing analytical control methods in chemical manufacturing environments.

Keywords: analysis of variance, weak nitric acid, technological unit, efficiency, stability, production.

Вступ. В умовах безперервного виробництва ключовими показниками є стабільність та рівномірність роботи агрегатів. Стабільна робота технологічних агрегатів забезпечує правильне ведення та економічність процесу виробництва. Відхилення у випуску продукції при однаковому технологічному оснащенні можуть вказувати на проблеми технічного стану, керування чи завантаження устаткування. Для оцінки енергоефективності виробничих об'єктів доцільно використовувати економіко-математичні методи [1].

Дисперсійний аналіз (ДА) – це метод статистичної обробки даних, спрямований на виявлення та кількісну оцінку факторів, що впливають на мінливість (дисперсію) даних у часі або між різними об'єктами (наприклад, цехами, підрозділами, підприємствами тощо) [2]. Цей підхід особливо важливий у контексті аналізу ефективності електроспоживання, оптимізації режимів роботи технологічного устаткування.

Постановка проблеми. ДА може бути ефективно застосований для оцінювання ефективності роботи змінного персоналу. Можна вибирати для оцінювання тільки денні або нічні зміни та порівнювати зміни між собою. При цьому необхідно пам'ятати, що кліматичні умови або властивості сировини, режими роботи устаткування різняться в різні часи доби.

Дисперсійний аналіз дозволяє визначити, які чинники (час, зміна, тип устаткування, виробниче завантаження тощо) роблять значний внесок у

коливання електроспоживання або вироблення продукції і наскільки вони статистично значущі.

Основні засади однофакторного дисперсійного аналізу:

За даними виробітку продукції по кожному технологічному агрегату або лінії (або електроспоживання, або питомих витрат електроенергії на тону продукції) формується таблиця даних. Далі формується таблиця з середніми значеннями та значеннями дисперсії. Після цього проводиться дисперсійний аналіз. Основні засади ДА наведені нижче.

При порівнянні кількох вибірок, які можна визначити як групи однієї вибіркової сукупності, загальний обсяг варіації характеристики поділяють за джерелами її утворення на міжгрупову (групову) та внутрішньогрупову (залишкову) за правилом розкладання варіації:

$$W_{заг} = W_{gp} + W_{зал}, \quad (1)$$

де $W_{заг}$ – загальна варіація; W_{gp} – груповая варіація; $W_{зал}$ – залишкова варіація.

Отже, загальна варіація ознаки визначається як впливом групувального (врахованого) фактора, так і безліччю випадкових (неврахованих) факторів. Співвідношення групової та залишкової варіацій показує співвідношення ступеня впливу врахованого та неврахованих факторів на загальну величину варіації, тобто дозволяє з'ясувати, чи є загальна варіація характеристики випадковою чи визначається дією групувального фактора.

У цьому випадку F – критерій Фішера визначають як відношення групової варіації до залишкової з урахуванням числа ступенів свободи варіації, тобто як відношення групової дисперсії до залишкової:

$$F_{факт} = \frac{S_{gp}^2}{S_{зал}^2}, \quad (2)$$

де S_{gp}^2 – груповая дисперсія; $S_{зал}^2$ – залишкова дисперсія.

Число ступенів свободи варіації визначають:

для загальної варіації:

$$v_o = N - 1;$$

для групової варіації:

$$v_{ep} = k - 1;$$

для залишкової варіації:

$$v_{зал} = v_{заг} - v_{ep} = (N - 1) - (k - 1) = N - k,$$

де N – загальна чисельність вибірки; k – кількість груп.

Звідси дисперсії дорівнюють:

$$S_{ep} = \frac{W_{ep}}{v_{ep}} = \frac{W_{ep}}{k - 1}; \quad S_{зал} = \frac{W_{зал}}{v_{зал}} = \frac{W_{зал}}{N - k}. \quad (3)$$

Загальний обсяг варіації для сукупності визначають як суму квадратів відхилень індивідуальних значень характеристики загальної середньої:

$$W_{заг} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_o)^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} X_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} X_{ij} \right)^2}{N}, \quad (4)$$

де $W_{заг}$ – загальна варіація; $\bar{X}_{заг}$ – загальна середня арифметична; X_{ij} – варіанти; k – число груп; n_i – чисельність ознак в групі; N – чисельність сукупності.

Групова варіація дорівнює сумі квадратів відхилень групових середніх від загальної середньої:

$$W_{ep} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X}_o)^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \right)^2}{n_i} \right) - \frac{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \right)^2}{N}, \quad (5)$$

де W_{ep} – групова варіація; \bar{X}_i – групові середні арифметичні.

При рівній чисельності груп формула (5) набуває вигляду:

$$W_{ep} = n \sum_{i=1}^k (\bar{X}_i - \bar{X}_o)^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n X_{ij} \right)^2}{n} - \frac{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n X_{ij} \right)^2}{N}. \quad (6)$$

Залишкову варіацію визначають як суму квадратів відхилень індивідуальних значень характеристики від середньої за групами:

$$W_{зал} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^2 - \sum_{i=1}^k \left(\frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \right)^2}{n_i} \right), \quad (7)$$

де $W_{зал}$ – залишкова варіація.

При рівній чисельності груп формула (7) має вигляд:

$$W_{зал} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 - \frac{\sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n X_{ij} \right)^2}{n}. \quad (8)$$

Однофакторний дисперсійний аналіз можна схематично подати в наступному вигляді, зведеному в табл. 1.

Таблиця 1 – Схема однофакторного дисперсійного аналізу

Джерела варіації	Варіація (сума квадратів відхилень)	Ступінь свободи варіації	Дисперсія	Відношення дисперсій	
				фактичне	табличне
Групова	$SSA = W_{ep}$	$v_{ep} = k - 1$	$S_{ep}^2 = \frac{W_{ep}}{v_{ep}}$	$F_{факт} = \frac{S_{ep}^2}{S_{зал}^2}$	$F_{табл}$
Залишкова	$SSE = W_{зал}$	$v_{зал} = N - k$	$S_{зал}^2 = \frac{W_{зал}}{v_{зал}}$	1	–
Загальна	$SST = W_{заг}$	$v_{заг} = N - 1$	$S_{заг}^2 = \frac{W_{заг}}{v_{заг}}$	–	–

Згідно сучасних позначень нині в економетриці використовують замість старих позначень варіації позначення групової дисперсії SSA , залишкової SSE , загальної SST .

Після визначення дисперсій розраховується статистика Фішера F з рівнем значимості P . Якщо рівень значимості $P > 0,05$, то нульова гіпотеза про відсутність впливу фактора може бути прийнята. Порівняння фактичного значення критерію $F_{\text{факт}}$ з табличним $F_{\text{табл}}$ при прийнятому рівні ймовірності судження та з урахуванням числа ступенів свободи варіації дозволяє визначити причини загальної варіації ознаки. Якщо $F_{\text{факт}} < F_{\text{табл}}$, то це означає, що загальна варіація визначається випадковими причинами і не залежить від дії групувального фактора, тобто відмінності між середніми несуттєві. Якщо $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$, загальна варіація ознаки визначається як дією випадкових причин, так і дією групувального чинника, тобто різниця між середніми істотна.

Дисперсійний аналіз в роботі проводиться на чотирьох однакових агрегатах з виробництва слабоазотної кислоти. Технологія виробництва описана в працях [3, 4].

Виробництво неконцентрованої (слабкої) азотної кислоти комплектується однаковими агрегатами уніфікованими комплектними лініями (далі – УКЛ-7).

Метод виробництва ґрунтується на каталітичному окисленні аміаку киснем повітря з наступною абсорбцією оксидів азоту хімічно очищеною водою або азотно-кислим конденсатом під тиском, не більшим ніж 0,8 МПа з каталітичною очисткою хвостових газів від оксидів азоту, з використанням в якості відновника газоподібного аміаку та рекуперацією енергії очищеного газу.

Для процесу каталітичного окислення аміаку активність каталізатора характеризує загальне перетворення аміаку в оксиди азоту й елементарний азот, а селективність – вихід корисного продукту – оксиду азоту (II) (далі – NO).

Одним з найважливіших компонентів кожного агрегату є газотурбінна установка типу ГТТ-3М. Вона призначена для постачання стисненого повітря в технологічну частину агрегату УКЛ виробництва неконцентрованої азотної кислоти з одночасним використанням тепла відхідних з турбіни газів для вироблення пари, та включає в себе: осьовий компресор і газову турбіну; повітряохолоджувач; нагнітач; універсальну камеру; редуктор; розгінний

електродвигун; допоміжне обладнання (маслосистема, валоповоротний пристрій, маслонасоси, маслоохолоджувач, вентилятор обдуву розгінного електродвигуна).

Компресор і нагнітач приводяться в рух за допомогою газової турбіни. Осьовий компресор конструктивно об'єднаний з газовою турбіною в одному корпусі і має з нею спільний вал. Нагнітач з'єднаний через редуктор і має більшу швидкість обертання.

Універсальна камера згорання турбіни забезпечує роботу газотурбінної установки під час пуску та в робочому режимі.

Редуктор – чотиривальний, горизонтального типу з розподіленням потужності між турбіною та розгінним електродвигуном, і приводом нагнітача. Електродвигун типу 2ФАЗ-800/6000 з фазним ротором призначений для розгону газотурбінної установки ГТТ-3М під час пуску і забезпечення балансу потужності установки в робочому режимі. Електродвигун укомплектований рідинним регулятором ковзання, призначеним для пуску і регулювання частоти обертання розгінного електродвигуна за рахунок плавної зміни опору в електричному колі ротора.

Баланс потужності газової турбіни, яка використовується осьовим компресором та нагнітачем для отримання стисненого повітря, підтримується роботою електродвигуна ФАЗ-800, електрична потужність якого в нормальному режимі може змінюватись від 0 кВт до 800 кВт.

У системі керування газотурбінною установкою ГТТ-3М передбачено автоматичне підтримання заданої частоти обертання турбіни за допомогою регулятора подачі природного газу в камеру згорання турбіни та автоматичне регулювання витрати повітря, яка змінюється в залежності від витрати природного газу в заданому співвідношенні.

Метою роботи є статистична оцінка однорідності роботи однакових технологічних агрегатів на прикладі чотирьох однакових агрегатів з випуску слабоазотної кислоти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якщо агрегати абсолютно однотипні і працюють у приблизно рівних умовах, то їхній виробіток продукції

або середнє споживання потужності та розкид (дисперсія) цих величин теж мають бути близькими.

Якщо виявляться значні відмінності, це є сигналом про порушення режимів роботи, зниження ККД якогось агрегату, нерівномірне завантаження, потенційну несправність.

Для проведення ДА необхідно зібрати щодобові дані про випуск (у тонах) чотирьох однотипних агрегатів з виробництва слабоазотної кислоти (умовно: №1, №2, №3, №4) за лютий 202... року. Дані структуровані у табл. 2 (рядки – дати, стовпці – агрегати).

Для перевірки гіпотези про відсутність відмінностей у середньому випуску продукції агрегатами застосовано однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA). Розраховується середнє значення та дисперсія електроспоживання або виробітку продукції кожного агрегату.

Виконується однофакторний ДА, щоб перевірити статистичні гіпотези таким чином:

Нульова гіпотеза H_0 "всі агрегати працюють однаково": $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$, де μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 – середні значення електроспоживання або виробітку продукції кожного агрегату відповідно.

Альтернатива гіпотеза H_1 : хоча одно із середніх значень відрізняється.

Таблиця 2 – Випуск слабоазотної кислоти на однотипних агрегатах, тонн на добу

Дата	Номер агрегату			
	1	2	3	4
1	313,243	316,816	306,959	354,456
2	311,847	317,245	308,304	349,091
...
27	358,504	361,128	356,585	370,182
28	347,150	348,334	344,231	358,152
Середнє значення	342,265	345,612	338,100	354,489
Дисперсія MS кожної вибірки	456,518	428,859	546,626	341,794
Середнє значення дисперсії				443,45

Якщо F -критерій значимий, то хоча б один агрегат статистично відрізняється від інших.

ANOVA дозволяє розділити загальну мінливість показника на два компоненти:

- міжгрупову (відмінності між агрегатами);
- внутрішньогрупову (природні коливання, шуми, похибки).

Результатом дисперсійного аналізу є F -критерій та P -значення. При $P < 0,05$ відмінності вважаються статистично значимими.

В підпрограмі «Однофакторний дисперсійний аналіз» пакету «Аналіз даних» програми «Microsoft Excel» виконаний розрахунок, приведений на рис. 1.

Дисперсійний аналіз

Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-Значення	F критичне
Між групами SSA	4072,923	3	1357,64	3,06	0,03	2,69
Залишкове SSE	47892,5	108	443,45	–	–	–
Загальне SST	51965,43	111	–	–	–	–

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд вікна програми «Microsoft Excel» з результатами дисперсійного аналізу

Результати свідчать, що при $F_{факт} > F_{табл}$ та при $P=0,03$ відмінності вважаються статистично значимими та нульова гіпотеза відкидається.

Після ANOVA можна провести ще:

- тест Тьюкі, щоб дізнатися, які саме агрегати різняться між собою;
- дисперсійну декомпозицію, щоби виділити внесок агрегатів у загальну нестабільність електроспоживання цеху.

Якщо ANOVA виявив значні відмінності, необхідно уточнити, між якими парами агрегатів вони спостерігаються. Для цього використовується критерій Тьюкі (Tukey HSD). Він порівнює всі можливі пари середніх значень і оцінює, чи є різницю між ними статистично значущими.

Для розрахунку критерія Тьюкі визначається середня дисперсія $MS_{сер.}$ усіх 4 виборок. Кожна виборка складається з $n=28$ значень.

З роботи [5] обирається критичне значення показника Тьюкі $q_{крит.}$ Для $n=28$ спостережень у кожній групі, кількості агрегатів $k=4$, число ступенів свободи $df=4 \cdot (28-1)=108$, величина $q_{крит.}=3,77$.

Розрахункове значення критерія Тьюкі HSD визначається за формулою (9):

$$HSD = q_{крит.} \cdot \sqrt{\frac{MS_{сер.}}{n}} = 3,77 \sqrt{\frac{443,45}{28}} = 15,0. \quad (9)$$

Розраховуються попарно різниці між середніми значеннями усіх виборок. Якщо різниця між середніми значеннями випуску продукції по різних агрегатах більше за величину критерія Тьюкі HSD , то це означає, що різниця між ними є статистично значущими. З табл. 2 можна зробити висновок, що агрегати 3 та 4 працюють в різних режимах.

Декомпозиція дисперсії обчислюється таким чином.

Для кількісної оцінки вкладу відмінностей між агрегатами у загальну мінливість випуску розраховується коефіцієнт:

$$\eta^2 = SSA/SST,$$

де SSA – сума квадратів між групами (агрегатами); SST – повна сума квадратів.

Значення η^2 показує, яку частку мінливості випуску можна пояснити відмінностями між агрегатами. Дані таблиці 2 доводять, що $\eta^2 = (4072,923/51965,4) \cdot 100\% = 7,8\%$ і, майже 8% мінливості випуску слабкоазотної кислоти можна пояснити відмінностями між агрегатами.

Які висновки можна зробити за результатами аналізу:

- якщо виробіток кислоти або середнє електроспоживання агрегату статистично вище – можливе перевитрата енергії через технічний стан;
- якщо у агрегату висока внутрішня дисперсія – нестабільність роботи, пульсація навантажень;
- якщо агрегат має низьке навантаження – може бути недовантаження, простій або проблеми з керуванням.

Виявлені відмінності можуть бути пов'язані з неоднаковими режимами експлуатації; технічним станом обладнання; нерівномірним завантаженням по виробничому ланцюжку.

Для того, щоби конкретизувати причини відмінностей та вжити заходів для підвищення рівномірності випуску необхідно провести додатковий аналіз. Методом експертних оцінок та методом побудови діаграми Ісікави [6] визначено фактори, від яких залежить виробіток слабоазотної кислоти. Діаграма Ісікави для цеху з слабоазотної кислоти наведена на рис. 2.

Мета побудови діаграми є виявлення максимально можливого числа факторів, від яких залежить виробіток слабоазотної кислоти. Для формалізації цієї процедури доцільно розділити усі фактори на декілька груп та відмітити це на діаграмі відповідними гілками. Ділення цих факторів проводиться по шести напрямкам. У деяких закордонних публікаціях цю процедуру представляють у вигляді комбінації букв РММММЕ, утворених від англійських слів: Personal (персонал, люди); Machine (машина, устаткування, верстати); Material (матеріал, сировина); Method (метод, технологія, режим); Measurement (вимірювання); Environment (навколишнє середовище).

Опитування експертів показало, що агрегату №3 довгий час не проводився капітальний ремонт. Тому цей агрегат має низький коефіцієнт корисної дії порівняно з іншими агрегатами. Необхідно також налаштувати кут нахилу лопаток турбіни на цьому агрегаті.

Таким чином, дисперсійний аналіз підтвердив наявність неоднорідності у роботі агрегатів. Методи ANOVA та тест Тьюкі дозволяють не лише підтвердити наявність відмінностей, а й локалізувати проблемні агрегати. Декомпозиція дисперсії дає змогу оцінити масштаб впливу агрегатних факторів на виробничий результат.

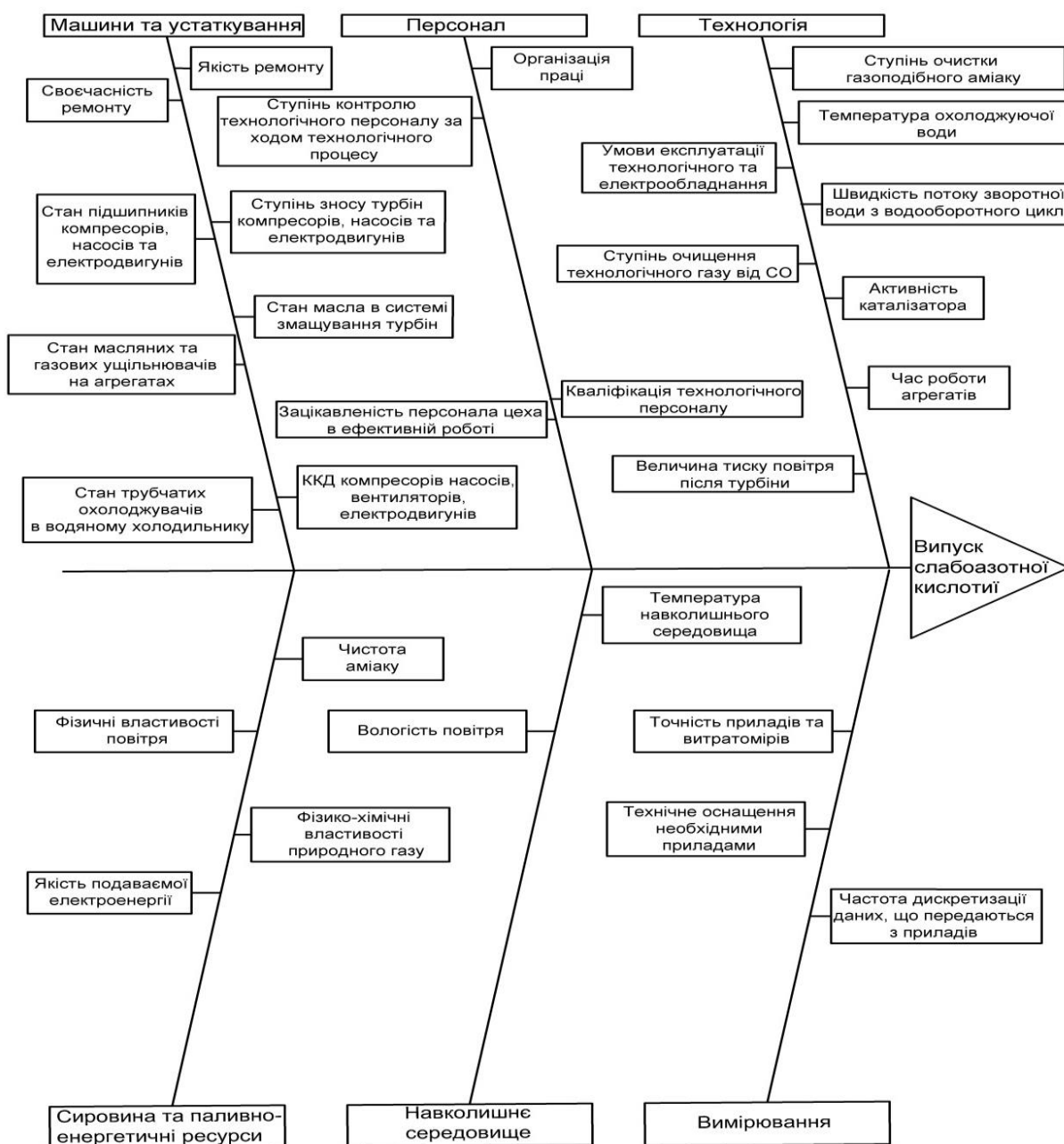


Рисунок 2 – Причинно-наслідкова діаграма Ісікави з неефективного споживання електроенергії в цеху з виробництва аміаку

Висновки.

1. У роботі запропонований статистичний підхід до оцінки ефективності та стабільності роботи декількох чотирьох однотипних технологічних агрегатів на прикладі чотирьох однотипних агрегатів цеху виробництва слабоазотної кислоти шляхом використання однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA).

2. Доведено, що дисперсійний аналіз дозволяє оперативно виявити відмінності у добовому випуску продукції або електроспоживання.

3. Для уточнення відмінностей між однотипними агрегатами використані тест Тьюкі, а також декомпозиція загальної дисперсії на міжгрупову та внутрішньогрупову складові.

4. Для визначення причини відмінності в виробітку продукції або електроспоживанні розроблена причинно-наслідкова діаграма Ісікави, що дозволила виявити причину різного режиму роботи однотипних агрегатів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Бедерак Я.С. Про обґрунтування вибору економіко-математичних методів оцінки енергоефективності виробничих об'єктів. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2017. № 1. С. 67–72.
2. Руденко В.М. Математична статистика. Навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 304 с.
3. Бойко В.І., Нінова Т.С. Загальна хімічна технологія і промислова екологія. Навч. посіб. Черкаси : Видавничий відділ ЧНУ, 2013. 126 с.
4. Денисюк Р.О. Хімічна технологія: Підручник. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2017. 350 с.
5. Harter H.L. Order statistics and their use in testing and estimation. Vol. 1: Tests based on range and studentized range of samples from a normal population // U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1970.
6. Панченко М.О. Управління якістю: теорія та практика. Навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 228 с.

REFERENCES:

1. Bederak Ya.S.(2017), "On the justification of the choice of economic and mathematical methods for assessing the energy efficiency of production facilities", *Electrical Engineering and Electromechanics* [Pro obhruntuvannia vyboru ekonomiko-matematychnykh metodiv otsinky enerhoefektyvnosti vyrobnychkykh ob'ektiv, Elektrotekhnika i Elektromekhanika], No. 1, pp. 67–72.
2. Rudenko V.M. (2012), Mathematical statistics, Textbook [Matematychna statystyka, Navchalnyi posibnyk], Kyiv : Center for Educational Literature, 304 p.
3. Boyko V.I., Ninova T.S. (2013), General chemical technology and industrial ecology, Textbook [Zahalna khimichna tekhnolohiia i promyslova ekolohiia, Navchalnyi posibnyk], Cherkasy : Publishing Department of Cherkasy National University, 126 p.
4. Denisyuk R.O. (2017), Chemical technology: Textbook [Khimichna tekhnolohiia: Pidruchnyk], Zhytomyr : Publishing House of ZhDU named after I. Franko, 350 p.
5. Harter H.L. (1970), Order statistics and their use in testing and estimation. Vol. 1: "Tests based on range and studentized range of samples from a normal population". U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
6. Panchenko M.O. (2019), Quality management: theory and practice, Textbook [Upravlinnia yakistiu: teoriia ta praktyka. Navchalnyi posibnyk], Kyiv : Center for Educational Literature, 228 p.

Надійшла до редакції 20.03.2025 року