УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОТУЖНОСТІ СПОТВОРЕННЯ СТРУМУ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА НА РІВЕНЬ ВТРАТ В НЬОМУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

БЕЗЗУБ М.А. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bialobrzeski@ukr.net;

ЯКИМЕЦЬ С.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ysm_seem@meta.ua;

ОЛІЙНІЧЕНКО М.Ю. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: oliynichenkomaxim@gmail.com;

ПОСТІЛ. А.О. аспірант кафедри електротехніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua.

Мета роботи. *Виявлення зв'язку рівня втрат трифазного трансформатора з потужністю спотворення викликаної гармоніками струму.*

Методи дослідження. *Під час проведення дослідження використано методи визначення втрат потужності та додаткових втрат в елементах електричної системи від вищих гармонік струму і напруги, метод візуального програмування, метод планування експерименту та метод ортогонального центрального композиційного плану.*

Отримані результати. *Проведено аналіз показників які характеризують спотворення напруги та струму, виявлено, що найбільш повно зазначені спотворення характеризують потужність спотворень струму та потужність спотворень напруги. Зазначені показники використані під час аналізу передачі електричної енергії трансформатором тягової підстанції. Відзначено, що порядок гармонік в потужності спотворення невілюється, а вищі гармоніки враховуються відповідним ефективним струмом вищих гармонік. Враховано специфіку приєднань вторинної обмотки трансформатора до споживача, а саме заземлення однієї з фаз вторинної обмотки. Для імітації спотворень струму використаний ряд комбінацій гармонік струму. Методом планування експериментом виконано ланку досліджень. Отримано коефіцієнти квадратичного рівняння регресії, яке пов'язує втрати потужності з рівнем гармонік струму навантаження третього, п'ятого та сьомого порядків. Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів рівняння регресії розраховано дисперсії та відповідні значення критерії Ст'юдента, в результаті визначені фактори які не впливають на процес та можуть бути виключені з рівняння регресії. Адекватність отриманого рівняння регресії перевірено за критерієм Фішера. Аналіз ефектів та їх взаємодії показав що стандартна помилка вибірки не перевищує 1,66 %. В результаті аналізу комбінацій гармонік струму, які задавалися в ході експерименту, відмічено що деякі з них призводять до одного й того же діючого струму фаз, при цьому потужність спотворень струму виявляється різною. Визначено найбільшу значимість рівня третьої гармоніки струму. Відзначено постійний рівень активної потужності на стороні високої напруги трансформатора, що зумовлено відсутністю спотворень напруги на ній.*

Наукова новизна. *Виявлено випадки комбінацій рівнів гармонік струму при яких показник потужності спотворення струму залишається незмінним, при цьому змінюється рівень втрат потужності трансформатора, який зумовлений гармоніками струму.*

Практична цінність. *Дані дослідження можливо застосувати для оцінки та зменшення рівня втрат потужності в трансформаторі шляхом фільтрації певних гармонік струму.*

Ключові слова: гармоніки, спотворення, трансформатор, потужність спотворення.

© Беззуб М.А., Бялобржеський О.В., Якимець С.М., Олійніченко М.Ю., Постіл. А.О., 2023
DOI 10.15588/1607-6761-2023-3-2

I. ВСТУП

Здійснення відкритих гірничих робіт супроводжується переміщенням корисної копалини. Гірська маса переміщується при виробничому процесі: при відвантаженні екскаваторами; при транспортуванні автомобільним, залізничним, конвеєрним і іншими видами транспорту. Для кар'єрного транспорту характерні: невеликі відстані переміщення; значні об'єми перевезень; залежність ефективності роботи іншого устаткування від надійності транспорту; значний нахил підйомів з вантажем; витрати на транспортування складають не менше 45 % [1].

Специфічний графік роботи локомотиву поїзду думпкарів, накладає відбиток на режим споживання електричної енергії тягової підстанції. Нестаціонарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах. Також слід врахувати той факт що при роботі електровоз призводить до спотворень напруги та струму. Вищевказані проблеми призводять до виникнення вищих гармонік [2].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вищі гармоніки в залежності від їх характеру, інтенсивності та тривалості негативно впливають на роботу систем автоматики та телемеханіки, знижують економічність та надійність роботи електричних мереж, зменшують термін експлуатації електрообладнання та призводять до багатьох інших негативних наслідків [3].

Вагомий внесок у вивчення вищих гармонік, розробку методик вимірювання, розрахунку та нормалізації несли вітчизняні та зарубіжні вчені: Ісмаїл, С. М., Баймолдін М. Кузнецов В. Г., Горбані, Дж., та ін. [4]–[7]. Проте основними роботами в сфері аналізу несинусоїдальних режимів систем електропостачання промислових підприємств є праці Загоя К. В його працях розкрита найбільша глибина питання, які пов’язані з вищими гармоніками для мереж промислових підприємств [8].

Для визначення впливу вищих гармонік використовують аналіз несинусоїдальних режимів з використанням потужностей зумовлених взаємодією напруги першої гармоніки зі струмом вищих гармонік та струм основної гармоніки з напругою спотворення [9].

Для визначення втрат потужностей використовують методи оцінки додаткових втрат в елементах електричної системи від вищих гармонік струму і напруги [10], які визначаються за виразом:

$$\Delta P_h = 3 I_h^2 R_{kh} k_h , \qquad (1)$$

де I_h – струм гармонік, R_{kh} R_{kh} – опір короткого замикання трансформатора на основній частоті, k_h – коефіцієнт який враховує збільшення опору короткого замикання для вищих гармонік.

Відомі дослідження в яких для аналізу спотворення електричної енергії автори використовують гармоніки потужності [11] на виводах кабельної лінії. При цьому спираючись на результати аналізу гармонік струму та напруги, відзначається їх недосконалість та необхідність подальшого дослідження.

В роботі [12] проведено дослідження режиму трансформатора понижувальної підстанції який живить комплексне навантаження з когенераційною установкою. Авторами відзначається факт суттєвого впливу на режим гармонік кратних трьом та запропоновано альтернативні показники потужності. Ці показники мають узагальнене теоретичне обґрунтування, при цьому зв'язок показників з впливом на елементи системи електропостачання не наведений.

Зважаючи на можливість існування того факту, що кожна гармоніка струму по різному впливає на елементи електричної мережі та її компоненти, виникає задача по визначенню значущості гармоніки, або їх комбінацій, на втрати потужності в трансформаторі.

III. МЕТА РОБОТИ

Аналіз звя’зку рівня втрат трифазного трансформатора з потужністю спотворення викликаної гармоніками струму.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Існує два основних способи для визначення рівня гармонічних спотворень. В першому випадку визначають коефіцієнт, який показує загальний вплив гармонік напруги чи струму – коефіцієнт загальних гармонійних спотворень. Для напруги даний коефіцієнт визначають з виразу:

$$K_h = \frac{\sqrt{\sum U_n^2}}{U_1} . \qquad (2)$$

де U_1 - діюче значення напруги основної гармоніки; U_n - діюче значення напруги вищої гармоніки. Наряду з зазначеним показником використовують коефіцієнт який показує вплив кожної окремої гармоніки струму чи напруги. Для напруги даний коефіцієнт визначають за формулою:

$$K_{hn} = \frac{U_n}{U_1} . \qquad (3)$$

Для більш детального дослідження впливу кожної гармоніки або їх комбінації на розподіл потужностей в трансформаторі необхідно визначити потужності спотворень струму та напруги. Для цього визначають значення ефективного струму [11]:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{9}}, \quad (4)$$

де $I_{a,b,c}$ – діючі значення струму кожної фази; I_n – нейтральний струм.

Відповідно до [11] як у струмі так і напрузі виділяють основну (I_{e1}, U_{e1}) та вищі гармоніки (I_{eh}, U_{eh}):

$$\begin{cases} I_e = I_{e1} + I_{eh} \\ U_e = U_{e1} + U_{eh} \end{cases}. \quad (5)$$

Ефективний струм основної гармоніки визначають з виразу:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{9}}, \quad (6)$$

де $I_{a1,b1,c1}$ – діючі значення струму першої гармоніки кожної фази.

Ефективний струм вищих гармонік:

$$I_{eh} = \sqrt{\frac{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2 + I_{nh}^2}{9}}, \quad (7)$$

де I_{ah}, I_{bh}, I_{ch} – діючі значення струмів вищих гармонік кожної фази.

Ефективна напруга основної гармоніки:

$$U_{e1} = \sqrt{\frac{3\left(U_{a1}^2 + U_{b1}^2 + U_{c1}^2\right) + U_{ab1}^2 + U_{bc1}^2 + U_{ca1}^2}{18}}, \quad (8)$$

де U_{a1}, U_{b1}, U_{c1} – діюче значення фазної напруги основної гармоніки, U_{ab1}, U_{bc1}, U_{ca1} – міжфазна напруга основної гармоніки.

Ефективна напруга гармонік:

$$U_{eh} = \sqrt{\frac{3\left(U_{ah}^2 + U_{bh}^2 + U_{ch}^2\right) + U_{abh}^2 + U_{bch}^2 + U_{cah}^2}{18}}, \quad (9)$$

де U_{ah}, U_{bh}, U_{ch} – діючі значення напруг вищих гармонік; U_{abh}, U_{bch}, U_{cah} – міжфазні напруги вищих гармонік.

Виходячи з рекомендацій стандарту [11] прийнято до уваги наступне:

потужність спотворень струму:

$$D_{eI} = 3U_{e1}I_{eh}; \quad (10)$$

потужність спотворень напруги:

$$D_{eU} = 3U_{eh}I_{e1}; \; D_{eU} = 3U_{eh}I_{e1}. \quad (11)$$

Для визначення втрат активної потужності в трансформаторі потрібно розрахувати активну потужність первинної та вторинної обмоток. Це можна зробити, використовуючи типові рівняння.

Миттєва потужність на стороні вищої напруги, визначають з виразу:

$$p_W = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c, \quad (12)$$

де u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c – миттєві значення напруги та струму фаз.

Активна потужність може бути розрахована як інтегральний показник:

$$P_W = \frac{1}{T}\int_0^T p_w dt, \quad (13)$$

де T – період вимірювання; t – час.

Потужність на стороні нижчої напруги, визначається аналогічним чином. В результаті втрати потужності в трансформаторі:

$$\Delta P = P_{W1} - P_{W2}. \quad (14)$$

Обмотки трансформатора тягової трансформаторної підстанції мають схему з'єднання $Y \backslash \Delta$. Також слід звернути увагу на підключення трансформатора до контактної мережі, воно є специфічним оскільки фаза С з'єднується з контактним рельсом. Вочевидь несиметричне навантаження суттєво впливає на режим трансформатора [12].

Для визначення коефіцієнтів спотворень кожної гармоніки, використовують масив даних струму та напруги знятих з трансформатора тягової підстанції [13] контактної мережі гірничозбагачувального комбінату. За допомогою розрахункової моделі [13], [14] величини мінімальних та максимальних значень коефіцієнтів для третьої, п'ятої та сьомої гармонік струму визначений на рівні 0,05 та 0,18 від основної гармоніки.

Беручи до уваги вищевказане в середовищі візуального програмування створено модель (рис. 1) суть якої в дослідженні впливу на втрати потужності трансформатора кожної окремої гармоніки та їх комбінацій.

Візуальна модель, представлена на рисунку 1, складається з джерела живлення (*Three-Phase Source*) напругою 150 кВ, *f*=50 Гц, трансформатора трансформаторної підстанції (*Three-Phase Transformer*) ТДН-16000/110 з наступними параметрами: $U_{HV} = 160$ кВ; $U_{LV} = 11$ кВ; $S = 1600$ кВА; *f*=50 Гц; $R_1 = 0{,}02$ в.о.; $R_2 = 0{,}02$ в.о.; $L_1 = 0{,}08$ в.о.; $L_2 = 0{,}1$ в.о.; блоку датчиків струму та напруги (*Three-Phase Measurement*), блоків візуалізації напруги та струму первинної та вторинної обмоток трансформатора (*Scope 1-2*), блоку визначення потужності спотворень струму та напруги (*DUDI1*), блоку визначення втрат в трансформаторі (PQ), та блоку впливу спотворення (*DUDI*) який є джерелом струмів фаз.

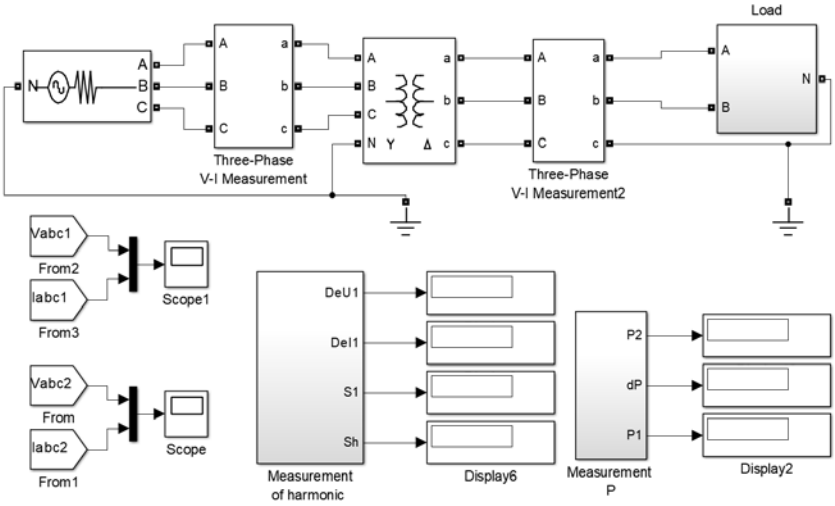


Рисунок 1 – Модель досліджуваної системи

Зважаючи на мету роботи струми у фазах трансформатора задані у вигляді:

$$i = I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_3 \sin(3\omega_1 t + \varphi_3) + \\ + I_5 \sin(5\omega_1 t + \varphi_5) + I_7 \sin(7\omega_1 t + \varphi_7), \quad (15)$$

де I_1, I_3, I_5, I_7 – діючі значення струму відповідних гармонік; $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_7$ – кути зсуву відповідних гармонік; $\omega_1, \omega_3, \omega_5, \omega_7$ – кутові частоти відповідних гармонік.

Діапазон зміни діючих значень струмів вищих гармонік I_3, I_5, I_7 приймаємо від 0,05 до 0,18 відносних одиниць до струму основної гармоніки I_1.

Для врахування всіх можливих комбінацій спотворюючих величин використано метод планування експерименту [15].

Відповідно до порядку складання центрального композиційного плану з зірковими точками визначені точки та зірки. В результаті отримано план експерименту (таблиця 1). За планом експерименту за допомогою розрахункової моделі створеної у візуальному середовищі програмування проведено експеримент шляхом реалізації послідовності комбінацій таблиці 1 в моделі рисунок 1. В результаті проведеного експерименту отримано дані які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – План експерименту та його результати

Вихідні дані				Результати вимірювань				
№ з/п	I_3,в.о.	I_5,в.о.	I_7,в.о.	D_i, вар	D_u, вар	P_2, Вт	P_1, Вт	ΔP, Вт
1	0,05	0,05	0,05	513400	86410	4648000	4721000	73280
2	0,18	0,05	0,05	1356000	177200	4646000	4721000	75680
3	0,05	0,18	0,05	1025000	171900	4647000	4721000	74490
4	0,18	0,18	0,05	1621000	231300	4644000	4721000	76890
5	0,05	0,05	0,18	1625000	225200	4647000	4721000	74500
6	0,18	0,05	0,18	1621000	273300	4640000	4721000	76900
7	0,05	0,18	0,18	1356000	269900	4646000	4721000	75710
8	0,18	0,18	0,18	1848000	311100	4643000	4721000	78110
9	0,00568	0,115	0,115	836000	170100	4647000	4721000	73950
10	0,22432	0,115	0,115	1830000	263100	4643000	4721000	77990
11	0,115	0,00568	0,115	1023000	172500	4647000	4721000	74480
12	0,115	0,22432	0,115	1540000	258700	4645000	4721000	76510
13	0,115	0,115	0,00568	1023000	142900	4647000	4721000	74470
14	0,115	0,115	0,22432	1540000	305200	4645000	4721000	76530
15	0,115	0,115	0,115	1181000	198700	4646000	4721000	75010
16	0,115	0,115	0,115	1181000	198700	4646000	4721000	75010

Переваги ортогонального центрального композиційного плану полягає в його простоті. Оскільки для отримання адекватного математичного опису процесів у вигляді рівняння регресії 2-го порядку на основі цих планів необхідно провести певну кількість дослідів, залежне від числа впливають на процес факторів, менше, ніж при інших видах планування [16].

Композиційні плани легко приводяться до ортогонального вибору відповідного «зоряного» плеча і перетворенням стовпців x_i^2.

Метою реалізації ортогонального центрального композиційного плану є отримання рівняння регресії у загальному вигляді:

$$y = b_0^* + b_1 x_1 + ... + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + ... + \\ + b_{(k-1)k} x_{k-1} x_k + b_{11} x_1^* + ... + b_{kk} x_k^* , \quad (16)$$

де b_0 – нульовий коефіцієнт регресії, b_1 – вибірковий коефіцієнт регресії, x_k – змінна.

Величини $x_{ij}^* = x_{ij}^2 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2$ (i – номер досліду в матриці планування, j - номер фактору) вводяться для забезпечення ортогональності матриці планування і виключення кореляції між факторами, для отримання рівняння регресії в звичайному вигляді:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + ... + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + ... + \\ + b_{(k-1)k} x_{k-1} x_k + b_{11} x_1^2 + ... + b_{kk} x_k^2 , \quad (17)$$

Основне завдання регресійного аналізу отримання математичної моделі процесу, перевірка адекватності отриманої моделі і оцінка впливу кожного фактору на процес.

Для визначення значущості отриманих коефіцієнтів рівняння регресії розраховують дисперсії. Якщо розрахункове значення критерія Ст'юдента більше за табличне значення то коефіцієнт b_j значущий, тобто фактор, відповідний цьому коефіцієнту робить істотний вплив на процес. В іншому випадку коефіцієнт b_j незначний фактор і в області факторного простору не робить істотного впливу на процес, і він виключається з рівняння регресії.

Перевірка рівняння регресії на адекватність проводиться за критерієм Фішера:

$$F_{розр} = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} , \quad (18)$$

де $s_{ад}^2$ – дисперсія адекватності, що обчислюється за формулою:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - y_{i,розр})^2}{n - B} , \quad (19)$$

в якій $y_{i,розр}$ – розрахункове значення вимірюваної величини (параметра оптимізації); B – число значущих коефіцієнтів b_j.

Табличний критерій Фішера, залежить від числа ступенів свободи чисельника і знаменника. В результаті перетворень матриці планування експерименту і проведеного регресійного аналізу отримуємо рівняння регресії для досліджуваного випадку наступному вигляді:

$$\Delta P = b_0 + b_1 I_3^* + b_2 I_5^* + b_3 I_7^* + b_{12} I_3^* I_5^* + b_{13} I_3^* I_7^* + \\ + b_{23} I_5^* I_7^* + b_{11} I_3^{*2} + b_{22} I_5^{*2} + b_{33} I_7^{*2} . \quad (19)$$

Для побудови регресійної моделі використано спеціалізоване програмне забезпечення статистичної обробки. Аналіз ефектів та їх взаємодії показав, що стандартна помилка вибірки не перевищує 1,66%. При цьому коефіцієнти взаємодії b_{12}, b_{13} та b_{23} мають нульову значимість (рис.1). найбільший коефіцієнт інфляції дисперсії склав 14,33236 для коефіцієнтів b_{11}, b_{22} та b_{33}.

Отримані математичні моделі є адекватними. Коефіцієнти, що стоять перед факторами, кажуть про значимість вхідних параметрів і вплив їх на досліджувані чинники, а також їх парну взаємодію на вихідну величину. Статистика R-квадрата вказує на те, що модель, яка встановлена, має адекватність 99,9999% змінності в *dP*. Налаштована на статистику *R*-квадрата, яка більше підходить для порівняння моделей з різною кількістю незалежних змінних, становить 99,9997 %. Стандартна помилка оцінки показує, що стандартне відхилення залишків дорівнює 2,35951. Середня абсолютна похибка (MAE) 1,18387 є середнім значенням залишків.

Статистична оцінка Дурбіна-Ватсона (DW) перевіряє залишки, щоб визначити, чи існує якась суттєва кореляція на основі порядку, в якому вони трапляються у даних. Оскільки значення *P* перевищує 5,0%, немає ознак серійної автокореляції в залишках на рівні значущості 5,0%.

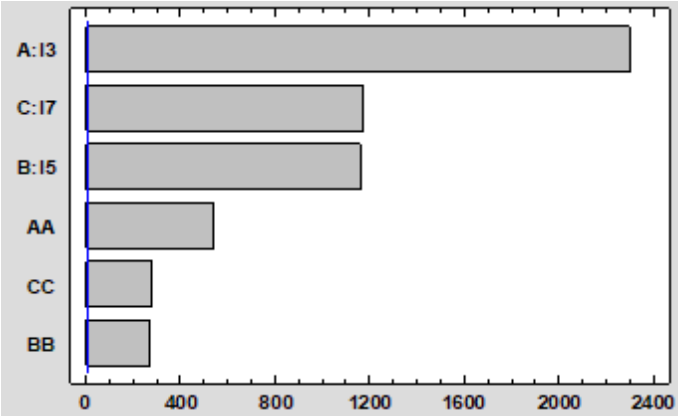
Діаграма Паретто розставляє значення факторів від їх величини впливу від найбільшого до найменшого. Таким чином рівняння регресії отриманої моделі має вигляд:

$$\Delta P = 72897.1 - 19.3143 \cdot I_3 - 47.4645 \cdot I_5 - 41.8002 \cdot I_7 + \\ + 830381.9 \cdot I_3^2 + 40633.6 \cdot I_5^2 + 41052 \cdot I_7^2$$

де значення змінних вказані у в одиницях.

Coefficient	*Estimate*
constant	72879,1
A:I3	- 19,3143
B:I5	- 47,4645
C:I7	- 41,8002
AA	80381,9
AB	0,0
AC	0,0
BB	40633,6
BC	0,0
CC	41052,0

a)



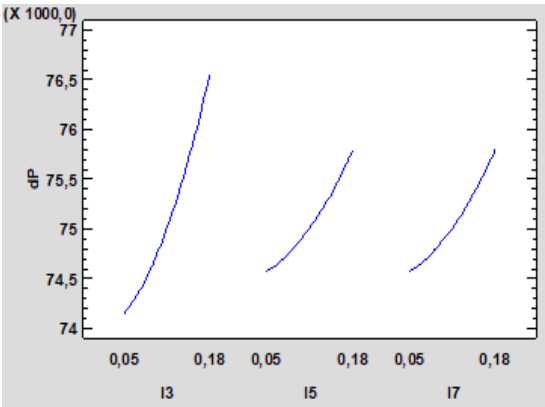
b)

Рисунок 2 – Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії:

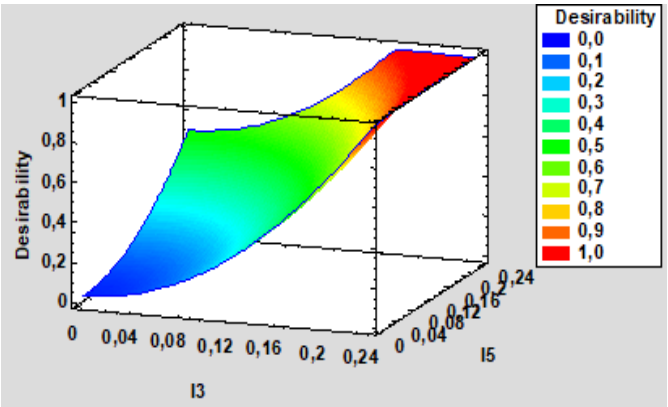
а) – коефіцієнти; б) – карта Паретто

Як показано на рисунку 3а найбільш суттєвий вплив на вихідну величину створює третя гармоніка I_3^* спричиняючи зміну втрат на 2,5 кВт, на відміну від п'ятої та сьомої.

Поверхня функції відгуку приведена на рисунку 3b. Таким чином при всіх досліджуваних варіантах співвідношення гармонік струму спостерігається різний рівень втрат потужності трансформатора. Очевидно (табл.1) що комбінації 2-3-5; 4-6-7; 11-13 та 12-14 призводять до одного й того ж діючого струму фаз. При цьому у випадках комбінації 4-6; 2-7; 11-13 та 12-14 спостерігаються однакові показники потужності спотворення струму D_{ei} (табл. 1).



a)



b)

Рисунок 3 – а) – графік впливу гармонік b) – зміна втрат потужності при різній комбінації I_3 та I_5

V. ВИСНОВКИ

З використанням відносних показників, що характеризують вплив гармонік струму та напруги на компоненти потужності, сплановано експеримент для дослідження залежності втрат трифазного трансформатора тягової підстанції.

Отримано коефіцієнти квадратичного рівняння регресії, яке пов'язує втрати потужності з рівнем гармонік струму навантаження третього, п'ятого та сьомого порядку. Визначену найбільшу значимість рівня третьої гармоніки струму.

Відзначено постійний рівень активної потужності на стороні високої напруги трансформатора, що зумовлено відсутністю спотворень напруги на ній.

Виявлено випадки комбінацій рівнів гармонік струму при яких показник потужності спотворення струму залишається незмінним, при цьому змінюється рівень втрат потужності трансформатора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Kuznetsov, V., Sychenko, V., Hubskyi. P., Myamlin, S., Kosariev, Y., Liashuk. V. Hybrid railway traction power supply system, 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems

(IEPS), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 208-211, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263194.

[2] Бітюков, С.Д., Сиченко, В.Г., Кузнецов. В.Г., Підвищення ефективності виробництва та використання енергетичних ресурсів. Українські залізниці. 2014. № 8 (14). с. 51-533.

[3] Олійник Ю.С. Аналіз спектра високих гармонік в системі «випрямляч – інвертор», Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, 2015, вип.2 (43) с. 93-99

[4] Ismael, S.M., Mekhamer, S.F., Abdelaziz, A.Y. (2013). Power System Harmonics in Industrial Electrical Systems: A Techno-Economic Assessment, Lap Lambert Academic Publishing, 156p ISBN 978-3-659-34734-4.

[5] Baimoldin, M., Uakhitova A., Bainiyazov, A. Analysis of electric power losses in electric networks in Kazakhstan, 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998479.

[6] Ghorbani, J., Mokhtari, H., (2015). Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Pp. 166-174.

[7] Kusko, A. 2007. Power Quality in Electrical Systems. 1st ed. New York: McGraw-Hill. ISBN: 9780071470759.

[8] Zagoya, C., Goletz, C-M., Grossmann, F., Rost, J-M., (2012). An analytical approach to high harmonic generation. New Journal of Physics, pp. 1-18, 093050. doi: 10.1088/1367-2630/14/9/093050.

[9] Mariscotti, A. Relevance of Harmonic Active Power Terms for Energy Consumption in some Railway Systems, in Proc. of the 24th IMEKO TC4 Int. Symp., Sept. 17-20, 2019, Xi'an, China. Pp. 117-121

[10] Bialobrzheskyi, O., Rod'Kin, D. (2020). Apparent power effectiveness for the assessment of the efficiency of the cable transmission line in the supply system with sinusoidal current. [(Ocena strat w linii przesyłowej kablowej w systemie zasilania prądem sinusoidalnym Przeglad Elektrotechniczny, 96(9), 26-29. doi:10.15199/48.2020.09.05.

[11] Bialobrzheskyi, O., Rod'kin, D., Gladyr, A. (2018). Power components of electric energy for technical and commercial electricity metering. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (2), 70-79. doi:10.29202/nvngu/2018-2/10.

[12] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions - Redline, in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) - Redline, vol., no., pp.1-52, 19 March 2010, doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5953405.

[13] Zagirnyak, M., Maliakova, M., Kalinov, A. Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 34, no. 3, pp. 808-823, 2015, doi: 10.1108/COMPEL-10-2014-0260

[14] C. F. Jeff Wu, Michael Hamada, Experiments: Planning, Analysis, and Optimization, John Wiley & Sons, Inc., 2021, 700p, doi:10.1002/9781119470007.

[15] Zagirnyak, M., Rodkin, D., Romashykhin, I., Rudenko N., Chenchevoi, V. Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the instantaneous power method, 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2016, pp. 1-4, doi:10.1109/CPEE.2016.7738721.

[16] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., Andrii, S. (2020). Application of IEEE 1459-2010 for the power investigation a traction substation transformer secondary voltage. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 199-204. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.925009.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2023

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CURRENT DISTORTION POWER OF THE SECONDARY WINDING OF A TRANSFORMER ON THE LEVEL OF LOSSES IN IT USING THE METHOD OF EXPERIMENT PLANNING

BEZZUB M.A. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

BIALOBRZHESKYI O.V. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bialobrzeski@ukr.net;

OLIYNICHENKO M.Y. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: oliynichenkomaxim@gmail.com;

YAKUMEC S.M. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ysm_seem@meta.ua;

POSTIL A.O. PhD student at the Department of Electrical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk,, Ukraine, e-mail: artur_postil@kdu.edu.ua.

Purpose. *Detection the relationship between the level of losses of a three-phase transformer and the power of distortion caused by current harmonics..*

Methodology. *During the research, the methods of determining power losses and additional losses in the elements of the electrical system from higher current and voltage harmonics, the visual programming method, the experiment planning method, and the orthogonal central composite plan method were used.*

Findings. *An analysis of the indicators characterizing voltage and current distortions was carried out, and it was found that these distortions are most fully characterized by the current distortion power and voltage distortion power. These indicators are used to analyze the transmission of electric energy by a transformer of a traction substation. It is noted that the order of harmonics in the distortion power is not eliminated, and higher harmonics are taken into account by the corresponding effective current of higher harmonics. The specifics of the transformer secondary winding connections to the consumer, namely the grounding of one of the secondary winding phases, were taken into account. A number of combinations of current harmonics were used to simulate current distortions. The experiment was carried out using the planning method. The coefficients of the quadratic regression equation that relates power losses to the level of load current harmonics of the third, fifth, and seventh orders are obtaine To determine the significance of the obtained coefficients of the regression equation, the variances and the corresponding values of the Student's criterion were calculated, as a result, factors that do not affect the process and can be excluded from the regression equation were identified. The adequacy of the obtained regression equation was checked by Fisher's criterion. The analysis of the effects and their interaction showed that the standard error of the sample does not exceed 1.66%. As a result of analyzing the combinations of current harmonics that were set during the experiment, it was noted that some of them lead to the same effective phase current, while the power of current distortion is different. The greatest significance of the level of the third harmonic of the current is determined. The constant level of active power on the high voltage side of the transformer is noted, which is due to the absence of voltage distortions on it.*

Originality. *Cases of combinations of current harmonic levels at which the current distortion power index remains unchanged, while the level of transformer power losses caused by current harmonics changes, have been identified.*

Practical value. *This research can be used to assess and reduce the level of power losses in a transformer by filtering certain current harmonics.*

Keywords: harmonics; distortion; transformer; current; distortion power.

REFERENCE

[1] Kuznetsov, V., Sychenko, V., Hubskyi. P., Myamlin, S., Kosariev, Y., Liashuk. V. (2020). Hybrid railway traction power supply system, 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 208-211, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263194.

[2] Bityukov, S.D., Sychenko, V.G., Kuznetsov. V.G. (2014). Increasing the efficiency of production and use of energy resources. Ukrainian Railways. No. 8(14). 51-533.

[3] Y.S. Olyynik. (2015). Analysis of the spectrum of high harmonics in the system "rectifier - inverter", Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, issue 2 (43). 93-99.

[4] Ismael, S.M., Mekhamer, S.F., Abdelaziz, A.Y. (2013). Power System Harmonics in Industrial Electrical Systems: A Techno-Economic Assessment, Lap Lambert Academic Publishing, 156p ISBN 978-3-659-34734-4.

[5] Baimoldin, M., Uakhitova A., Bainiyazov, A. (2017). Analysis of electric power losses in electric networks in Kazakhstan, 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-5, doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998479.

[6] Ghorbani, J., Mokhtari, H., (2015). Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Pp. 166-174.

[7] Kusko, A. (2007). Power Quality in Electrical Systems. 1st ed. New York: McGraw-Hill. ISBN: 9780071470759.

[8] Zagoya, C., Goletz, C-M., Grossmann, F., Rost, J-M., (2012). An analytical approach to high harmonic generation. New Journal of Physics, pp. 1-18, 093050. doi: 10.1088/1367-2630/14/9/093050.

[9] Mariscotti, A. Relevance of Harmonic Active Power Terms for Energy Consumption in some Railway Systems, in Proc. of the 24th IMEKO TC4 Int. Symp., Sept. 17-20, 2019, Xi'an, China. Pp. 117-121

[10] Bialobrzheskyi, O., Rod'Kin, D. (2020). Apparent power effectiveness for the assessment of the efficiency of the cable transmission line in the supply system with sinusoidal current. [(Ocena strat w linii przesyłowej kablowej w systemie zasilania prądem sinusoidalnym Przeglad Elektrotechniczny, 96(9),

26-29. doi:10.15199/48.2020.09.05.

[11] Bialobrzheskyi, O., Rod'kin, D., Gladyr, A. (2018). Power components of electric energy for technical and commercial electricity metering. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (2), 70-79. doi:10.29202/nvngu/2018-2/10.

[12] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions - Redline, in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000) - Redline, vol., no., pp.1-52, 19 March 2010, doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5953405.

[13] Zagirnyak, M., Maliakova, M., Kalinov, A. (2015). Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, vol. 34, no. 3, pp. 808-823, doi: 10.1108/COMPEL-10-2014-0260

[14] C. F. Jeff Wu, Michael Hamada, (2017,). Experiments: Planning, Analysis, and Optimization, John Wiley & Sons, Inc., 700p, doi:10.1002/9781119470007.

[15] Zagirnyak, M., Rodkin, D., Romashykhin, I., Rudenko N., Chenchevoi, V. (2016). Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the instantaneous power method, 2016 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), pp. 1-4, doi:10.1109/CPEE.2016.7738721.

[16] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., Andrii, S. (2020). Application of IEEE 1459-2010 for the power investigation a traction substation transformer secondary voltage. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 199-204. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.925009.