

Планування технічного обслуговування силових трансформаторів за результатами контролю їх частотних характеристик

М.О. Гришук

Вінницький національний технічний університет,
Україна

E-mail: grishuk.maksim.93@ukr.net

О.О. Рубаненко

Вінницький національний технічний університет,
Україна

E-mail: olenarubanenko@ukr.net

О.Є. Рубаненко

Вінницький національний технічний університет,
Україна

E-mail: rubanenkoae@ukr.net

Анотація- На основі аналізу літературних джерел показано, що в електроенергетичній системі силові трансформатори (СТ) – це вартісний та відповідальний вид електричного обладнання. Розглянуто метод аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), який шляхом використання результатів вимірювань амплітудних значень напруги сигналу відгуку на тестовий сигнал та напруги тестового сигналу, визначення коефіцієнта передачі тестового сигналу на різних частотах дозволяє виявити відхилення цього коефіцієнта від нормованих його значень на частотах, на яких проявляються найбільш часті пошкодження СТ дозволяє обґрунтувати технічний стан трансформатора та вузлів. Використано метод найменших квадратів, теорему Гаусса-Маркова та матрицю коваріацій для статистичного оцінювання параметрів регресійної моделі, отриманої за результатами вимірювань. Визначено регресійне рівняння забезпечує найменше значення суми квадратів відхилень результатів вимірювань від обчислених за рівнянням регресії. На прикладі однієї амплітудно-частотної характеристики досліджуваного за місцем розташування силового трансформатора, запропоновано алгоритм визначення рекомендованого терміну та дати проведення наступних вимірювань АЧХ, з метою зменшення ризику виникнення аварійного режиму та зменшення витрат на експлуатацію силового трансформатора шляхом збільшення кількості високоінформативних випробовувань та вимірювань діагностичних параметрів.

Також визначено межу 5-ти відсоткового відхилення на інформативному проміжку частоти, для подальшого визначення ймовірного перетину графіків у визначених точках, такої межі, з метою прогнозування ймовірного пошкодження обмоток.

Ключові слова - технічний стан, трансформатор, амплітудно-частотна характеристика.

I. ВСТУП

Відомо що в електроенергетичній системі, силові трансформатори (СТ) - це вартісні та відповідальні елементи обладнання [1÷3]. Кожне несподіване відключення СТ пов'язане з фінансовими втратами для електроенергетичного підприємства, а також споживачів електроенергії, які отримують постачання електроенергії через цей трансформатор [4]. Крім того виведення з експлуатації такого обладнання призведе до зміни режиму роботи електроенергетичної системи, що

призведе до значних втрат електричної енергії. Деякі пошкодження можуть призвести до спалаху вогню трансформаторного резервуара, чи навіть до вибуху, чи витік мінерального масла (все ще домінуюче середовище для ізоляції та охолодження в силових трансформаторах), що спричинить забруднення ґрунту та води. Надійність трансформатора впливає на надійність електромережі. Тому підтримання трансформатора в справному стані важливе завдання для підвищення надійності системи [3, 4].

Одним із важливих факторів, підтримання СТ в належному технічному стані, є алгоритм проведення діагностування та визначення періоду проведення вимірювань. Правильний вибір діагностичної процедури та правильна інтерпретація результатів, отриманих при різних видах вимірювань результатів [4], забезпечить електроенергетичному підприємству надійну роботу його мережі.

Аналіз частотної характеристики (FRA) - це метод, який зазвичай використовується для оцінки стану обмоток та магнітопроводу трансформатора[3].

Аналіз літературних джерел [6÷8], свідчить про те, що з допомогою вимірювання частотних характеристик (наприклад приладом FRAnalyzer), з'являється можливість виявлення таких дефектів навіть на ранній стадії їх розвитку.

В [9÷11] йдеться про те, що якщо, нормативна база частотних характеристик, введених в експлуатацію СТ, накопичена, то у разі необхідності діагностування обладнання, планового чи у разі невеликої аварії, можна виконати дослідження СТ, та визначити його технічний стан. Однак з [2], відомо що, обґрунтування висновків за результатами використання такого діагностичного обладнання в Україні обмежено відсутністю нормативної технічної документації. Що обмежує можливість повноцінно використовувати таке обладнання.

Автори [12÷14], описують можливість виявлення несправності СТ, на основі порівняння попередньо отриманої АЧХ та виміряної характеристики під час дослідження. Оскільки ідея FRA аналізу щодо стану обмотки СТ ґрунтується на тому, що відхилення або геометричні деформації обмотки стосуються зміни внутрішніх відстаней між витками та обмотками, які визначають його ємності та індуктивності. А в [9÷10]

звертається увагу на вплив параметрів СТ на напругу сигналу відгуку та тестовий сигнал загалом. Разом з тим, у [2,4], автори підтверджують, що визначення технічного стану СТ, з допомогою визначення відхилення АЧХ на 5% і більше, дасть змогу, говорити про несправний технічний стан СТ.

В такому разі авторами, даного дослідження, пропонується провезти додаткові дослідження стану, наприклад такі як контроль тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, визначення опору постійному струму, проведення експериментів короткого замикання та холостого ходу, хроматографічного аналізу розчинених в трансформаторній оливі газів, тепловізорне обстеження об'єкту, тощо. Та виконати висновки відповідно до [15]. Якщо ж відхилення характеристики буде меншим ніж 5%, тоді технічний стан СТ вважається справним, і наступне вимірювання АЧХ буде проводитись згідно з графіком проведення планового графіку технічного обслуговування, у відповідності до [15]. Однак, виникає питання, як діяти у разі виявлення відхилення близького за значенням до 5%?

В статті пропонується провезти спостереження за тенденцією зростання чи спадання передатної функції в конкретній точці, для попередження пошкодження СТ, оскільки такий агрегат є досить важливим елементом електроенергетичної системи.

Отже, випробування на виявлення деформації обмоток та магнітопроводу мають важливе значення для безпечної експлуатації СТ. Такі пошкодження, важливо виявити на ранній стадії їх розвитку, для цього потрібно використовувати та перевіряти, всі сигнали, які можуть вказувати на потенційний дефект трансформатора. Тоді на основі належної діагностичної процедури може бути

прийнято ефективне та раціональне рішення щодо подальшої експлуатації даного СТ.

Метою досліджень, результати яких приведені у статті, є підвищення якості планування технічного обслуговування СТ за результатами контролю частотних характеристик.

Для якісного проведення дослідження розв'язувались задачі:

- аналіз бази АЧХ СТ;
- визначення технічного стану, виявлення тенденцій відхилення значень діагностичних параметрів від початковий в водночас норм побудова лінії тренду досліджуваного СТ за результатами аналізу отриманих АЧХ;
- визначення рекомендованого терміну проведення наступних вимірювань АЧХ.

II. ОСНОВНА ЧАСИНА

A. Аналіз та упорядкування АЧХ СТ

Для вирішення поставлених задач, отримано АЧХ, які є результатами випробувань, частотним аналізом силового трансформатора типу ТМГ 1000/10 У1. Характеристики, представлено на fig 2, виміряні на діючому СТ, впродовж терміну його експлуатації, для перевірки його технічного стану. Вимірювання проводились з допомогою приладу FRAnalyzer фірми omicron на діючих електроенергетичних підприємствах, такі як АТ «ВІННИЦЯОБЛЕНЕРГО» (Вінницька область), та Писарівська ФЕС ТОВ Сервістрансавто (Хмельницька область), процес проведення вимірювань представлено на fig 1.



Fig. 1. Процес проведення діагностування СТ

Метод частотного аналізу АЧХ передбачає аналіз амплітудних значень сигналу відгуку на тестовий сигнал i , в наш час, застосовується для діагностування СТ [13÷15]. Цей метод полягає у тому, що спочатку вимірюються амплітудні значення напруги сигналу відгуку на тестовий сигнал ($U_{\text{амп.відг}}$) та напруги тестового сигналу ($U_{\text{амп.тест}}$). Далі визначається коефіцієнт передачі тестового сигнал на різній частоті (значення передатної функції), як результат ділення

амплітудного значення напруги $U_{\text{амп.відг}}$ (сигнала відгуку на тестовий сигнал для поточної частоти цього сигналу) на амплітудне значення напруги (тестового сигналу для такої ж частоти) $U_{\text{амп.тест}}$. Цей результат часто записується у децибелах. Тоді він визначається за наступною формулою, яка є передатною функцією [16] тестового сигналу (1) (F):

$$k(u) = 20 \cdot \log_{10} U_{\text{амп.відг}} / U_{\text{амп.тест}} \quad (1)$$

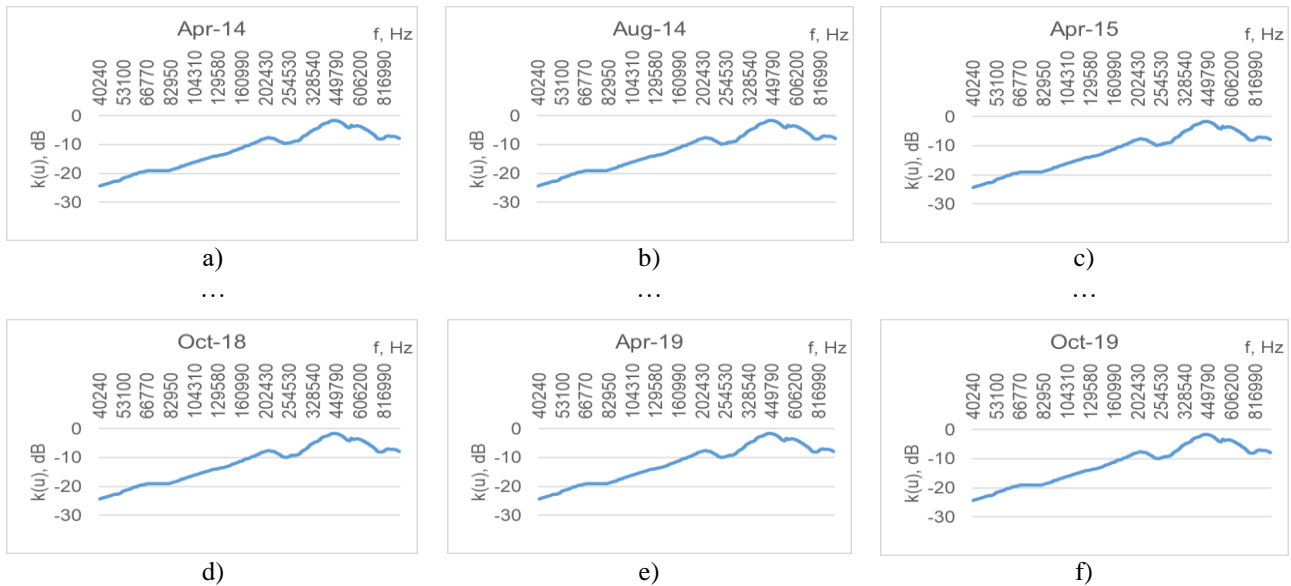


Fig. 2. Результати отриманих АЧХ під час експлуатації СТ: а) квітень 2014р.; б) жовтень 2014р.; с) квітень 2015р.;... ; д) жовтень 2018р. е) квітень 2019р.; ф) жовтень 2019р.

Під час порівняння поточної кривої з попередньою, відхилень не спостерігається, але спостерігаються відхилення в межах 5% (fig. 3). Це свідчить про справний стан СТ. Проте, враховуючи процеси під час експлуатації такого агрегату (електродинамічні сили, короткі замикання, тощо), до наступного планового технічного діагностування, є ймовірність пошкодження обмоток СТ, що може призвести до виводу його із експлуатації.

Пропонується дослідити тенденцію відхилень АЧХ, та спрогнозувати ймовірність виходу з ладу СТ, для прийняття правильного рішення щодо рекомендованої наступної дати проведення діагностування.

Для цього побудуємо графіки зміни вимірної величини у конкретних точках, в яких під час дослідження виявлено зміну значень передатної функції $k(u)$, частина результатів представлена на fig 4.

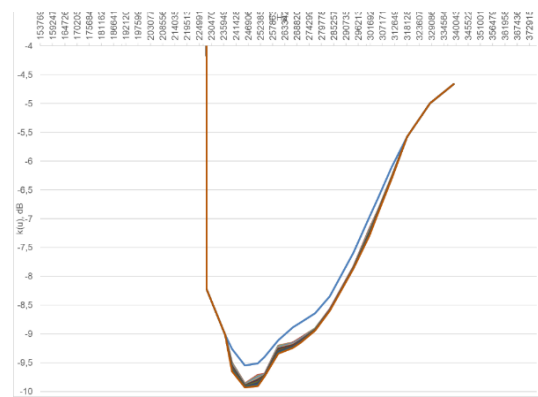


Fig. 3. Графік порівняння отриманих АЧХ.

Для цього побудуємо графіки зміни вимірної величини у конкретних точках, в яких під час дослідження виявлено зміну значень передатної функції $k(u)$, частина результатів представлена на fig 4.

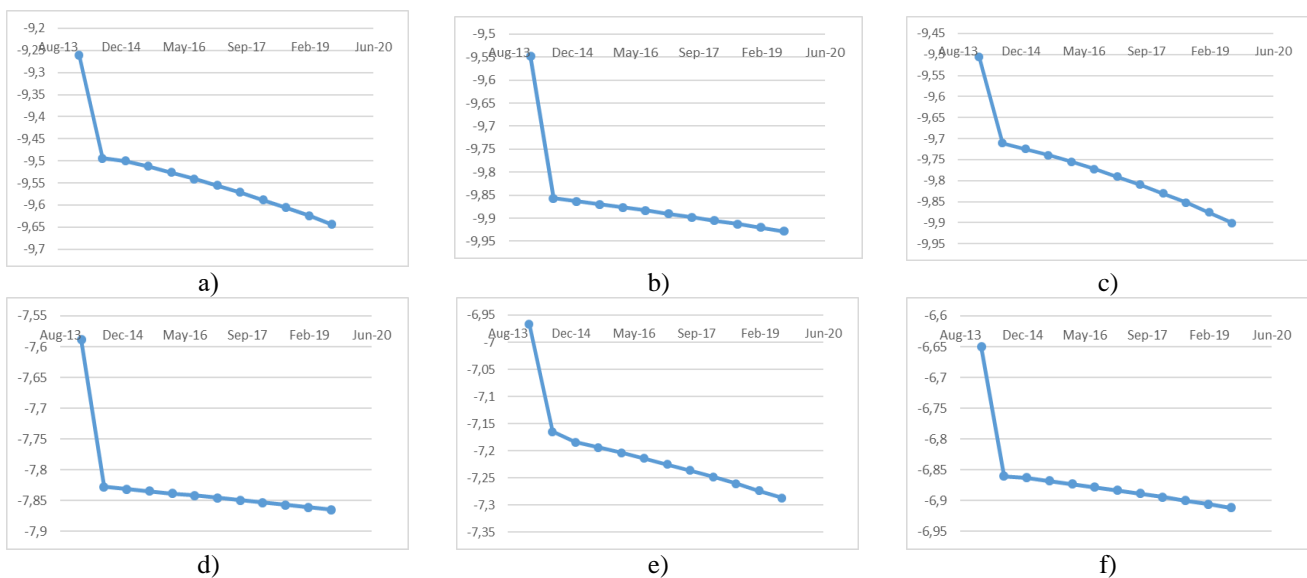


Fig. 4. Результати порівняння у досліджуваних точках, де спостерігались відхилення:

- a) $k(u) = -9,2616$ dB, при $F = 239640$ Hz; б) $k(u) = -9,5472$ dB, при $F = 245490$ Hz; с) $k(u) = -9,5064$ dB, при $F = 251480$ Hz;... ; д) $k(u) = -7,5888$ dB, при $F = 294150$ Hz; е) $k(u) = -6,9666$ dB, при $F = 301330$ Hz; ф) $k(u) = -6,6504$ dB, при $F = 304980$ Hz

Таким чином на досліджуваних точках картина на проміжку досліджуваної частоти набуває вигляду представленому на fig 5:

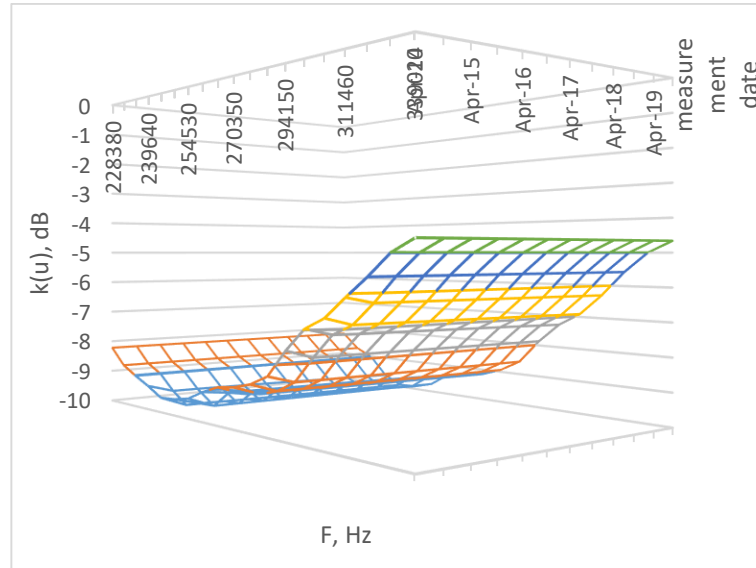


Fig. 5. Тенденція зміни АЧХ протягом досліджуваного періоду

За [2,4] визначимо межу 5-ти відсоткового відхилення на даному проміжку частоти, для подальшого визначення ймовірного перетину графіків у визначених точках, такої межі, з метою прогнозування ймовірного пошкодження обмоток СТ.

Отже для кожної із досліджуваних точок, визначено 5% межу. Результати представлені в таблиці:

TABLE I. РЕЗУЛЬТАТИ ОТРИМАННЯ 5-% МЕЖІ, ДОСЛІДЖУВАНИХ ТОЧОК

Частота вимірювань, Гц	239640	245490	...	301330	304980
Досліджувана точка, дБ	-9,2616	-9,5472	...	-6,9666	-6,6504
5% межа, дБ	-9,7246	-10,024	...	-7,31493	-6,98292

Побудуємо графіки зміни досліджуваних точок, з урахуванням 5% вої межі, та побудуємо «лінію тренду», для прогнозування тенденції зміни відхилення АЧХ. Лінію тренду, пропонується побудувати у вигляді поліноміального рівняння, оскільки для апроксимації поставленої задачі, метод передбачає найбільш точні результати прогнозування. Метод поліноміальної апроксимації, вирішується з допомогою методу найменших квадратів у відповідності до рівняння (2):

$$y = b + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 + \dots + c_n \cdot x^n \quad (2)$$

де b та $c_1 \dots c_n$ – константи.

Метод найменших квадратів (МНК) є одним із методів регресійного аналізу, який використовується для статистичного оцінювання параметрів регресійної моделі за емпіричними даними. Що дозволяє адекватно оцінити, виміряну АЧХ СТ. За цим методом параметри досліджуваної моделі повинні відповідати такому рівнянню регресії, що забезпечує найменше значення суми квадратів відхилень емпіричних даних від тих, що обчислені за рівнянням регресії. Так, з двох різних наближень тієї ж самої емпіричної функції, що задана у вигляді таблиці, кращим вважається те, для якого сума квадратів відхилення має найменше значення.

Графік функції проходить таким чином, що різниця між значеннями функції типу (3) та ординатами емпіричних точок була б якомога менше.

$$\hat{Y} = f(x) \quad (3)$$

Теорема Гаусса – Маркова відповідає узагальненню умов застосування методу найменших квадратів. Якщо прийняти припущення моделі, то рівняння (2) набуває вигляду (4):

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot X_{i1} + b_2 \cdot X_{i2} + \dots + b_m \cdot X_{im} + \varepsilon_i \quad (4)$$

де $i = \overline{1, n}$, n – обсяг вибірки (кількість емпіричних точок); X_i – детермінована величина (у загальному випадку це матриця результатів n спостережень m -вимірної випадкової величини X , що відповідає сукупності зовнішніх факторів);

$$M(\varepsilon_i) = 0, M(\varepsilon_i^2) = V(\varepsilon_i) = \sigma^2,$$

де $V(\varepsilon)$ – матриця коваріацій (попарних варіацій) похибок, ε_i – похибка i -го вимірювання;

$$M(\varepsilon_i \varepsilon_s) = 0, \text{ при } t \neq s.$$

де t і s – номери вимірювань, то оцінки параметрів $\widehat{b}_0, \widehat{b}_1, \dots, \widehat{b}_m$, які отримані за МНК, мають найменшу дисперсію серед усіх лінійних незсунутих оцінок, тобто ці оінки є ефективними.

Моделі, які побудовані з використанням методу найменших квадратів при виконанні умов теореми Гаусса – Маркова, називаються класичними економетричними моделями, а сам метод їх побудови називається МНК, тобто однокроковий метод найменших квадратів.

Розглянемо алгоритм вирішення поставленої задачі. Для лінійної моделі маємо умовне рівняння:

$$f(x, \hat{b}_0, \hat{b}_1).$$

Для досліджуваної моделі: маємо рівняння (5):

$$k(u, \hat{F}_0, \hat{F}_1, \hat{F}_2) = \hat{F}_0 + \hat{F}_1 \cdot x_1 + \hat{F}_2 \cdot x_1^2. \quad (5)$$

де u – напруга тестового сигналу, \hat{F}_i – частота тестового сигналу що подається в досліджуваній точці. За методом НМК складемо функцію суми квадратів нев'язок (6):

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\hat{F}_0 + \hat{F}_1 \cdot x_1 + \hat{F}_2 \cdot x_1^2 - k_i \right)^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

де \hat{F}_i – частота тестового сигналу, k_i – вільний член. З метою апроксимації отриманих емпіричних даних та у відповідності до рівнянь (5–6), визначимо рівняння лінії тренду, для кожної із досліджуваних точок (показані на fig.6 та table II):

TABLE II. РЕЗУЛЬТАТИ ОТРИМАННЯ ЛІНІЇ ТРЕНДУ

Досліджувана точка, дБ	Частота, Hz	Поліноміальне рівняння, лінії тренду	Коефіцієнт R ²
-9,2616	239640	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,84x + 12\,002,27$	0,89
-9,5472	245490	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 1,18x + 16\,817,70$	0,81
-9,5064	251480	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 + 0,00x^2 - 0,75x + 10\,757,31$	0,92
-9,3942	254530	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 1,14x + 16\,239,65$	0,78
-9,1086	260470	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,34x + 4\,831,71$	0,96
-8,8842	267110	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,98x + 14\,072,21$	0,83
-8,8026	270350	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 1,01x + 14\,444,53$	0,83
-8,6394	276940	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 + 1,00x + 14\,277,22$	0,78
-8,3436	283700	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,88x + 12\,566,39$	0,78
-7,5888	294150	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,91x + 13\,075,31$	0,78
-6,9666	301330	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,77x + 11\,066,89$	0,89
-6,6504	304980	$k(u) = -0,00x^3 + 0,00x^2 - 0,79x + 11\,296,54$	0,81

Відповідно до отриманих рівнянь побудуємо лінії тренду для досліджуваних точок (fig.6):

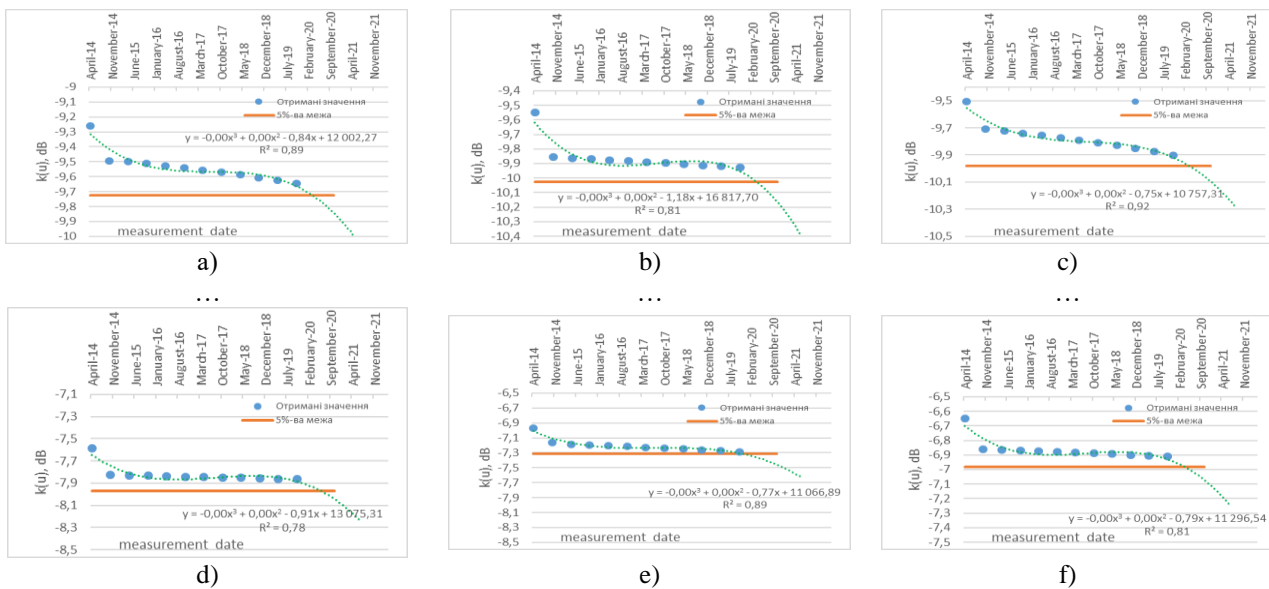


Fig. 6. Рисунок 6. Результати побудови лінії тренду для АЧХ в досліджуваній точці, де спостерігались відхилення: а) $k(u) = -9,2616$ дБ, при $F = 239640$ Hz; б) $k(u) = -9,5472$ дБ, при $F = 245490$ Hz; в) $k(u) = -9,5064$ дБ, при $F = 251480$ Hz; ... ; д) $k(u) = -7,5888$ дБ, при $F = 294150$ Hz; е) $k(u) = -6,9666$ дБ, при $F = 301330$ Hz; ф) $k(u) = -6,6504$ дБ, при $F = 304980$ Hz

III. ВИЗНАЧЕННЯ РЕКОМЕНДОВАНОГО ТЕРМІНУ ПРОВЕДЕННЯ НАСТУПНИХ ВИМІРЮВАНЬ АЧХ

З вище наведеного рисунку видно, що у досліджуваній точці значення передатної функції «-9,2616 дБ» при частоті тестового сигналу «239640 Hz» лінія тренду перетинає 5% значення в точці «February-20», рис.5.а. Це значення показує, що із врахуванням тенденції зміни відхилень, є ймовірність перетину (у

даній досліджуваній точці), поточної АЧХ, з попередньо виміряною АЧХ. Що в свою чергу може призвести до такого пошкодження як наприклад зсув витків обмоток. Та враховуючи те що досліджуваних точок є декілька пропонується визначити середню рекомендовану дату проведення діагностування ТС, шляхом аналізу його АЧХ. Таким чином з fig.5 маємо результати отриманих рекомендованих термінів, проведення вимірювань:

TABLE III. РЕЗУЛЬТАТИ ОТРИМАННЯ ЛІНІЙ ТРЕНДУ

Досліджувана точка, dB	-9,2616	-9,5472	-9,5064	-9,3942	-9,1086	-8,8842	-8,8026	-8,6394	-8,3436	-7,5888	-6,9666	-6,6504
Частота, Hz	239640	245490	251480	254530	260470	267110	270350	276940	283700	294150	301330	304980
Точка перетину 5%-ї межі ліній тренду	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Apr.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20	Feb.-20

Таким чином середня дата наступного рекомендованого проведення діагностування ТС складає лютий 2020 р. Враховуючи це, та період проведення вимірювань АЧХ, авторами пропонується виконати вимірювання АЧХ СТ не відповідно до плану-графіку, а в лютому 2020 р.

IV. ВИСНОВКИ

Приведений в статті приклад свідчить про можливість визначення технічного стану СТ шляхом аналізу АЧХ, отриманих за місцем його розташування.

Запропонований в статті метод аналізу АЧХ, дає змогу обґрунтувати час проведення наступних вимірювань.

Обґрунтування часу проведення наступних вимірювань, за певних умов, створює передумови підприємствам, що експлуатують СТ, вчасно вжити заходів з забезпечення безаварійної експлуатації СТ та уникнути зайвих вимірювань.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Гришук, М. О. обґрунтування оптимальної кількості дослідів для визначення ачх силового трансформатора під час його відключення з метою діагностування. / Гришук, М. О., Дмуховський, В. П., Лабзун, М. П., Рубаненко, О. Є. //І Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (ЕЕЕС-2018)». Збірник наукових праць. Харків:«Друкарня Мадрид», 2018. 102 с., 43.

[2] Рубаненко, О. Є. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA. / Рубаненко, О. Є., Лабзун, М. П., Гришук, М. О.// Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. –2017. –№ 186. –С 103–106.

[3] Alsuhaibani, S. A review of frequency response analysis methods for power transformer diagnostics./ Alsuhaibani, S., Khan, Y., Beroual, A., & Malik, N. H. // Energies, 9(11), 879. –doi:10.3390/en9110879

[4] Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія // Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Лесько В.О., Нетребський В.В. – Вінниця: ВНТУ, 2018. –136 с.

[5] Рубаненко, О. Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів [Текст] / О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Гришук // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2017. – № 23 (1245). – С. 41-46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

[6] Tenbohlen, S. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungs transformatoren" (em inglês) / S. Tenbohlen, F. Vahidi, P. Müller, J. Gebauer, M. Krüger // Proc. Stuttgarter Hochspannungs symposium. – 2012. – P. 61-70.

[7] Tenbohlen, S. Diagnostic measurements for power transformers / Tenbohlen, S., Coenen, S., Djamali, M., Müller, A., Samimi, MH, & Siegel, M. // Energies. – 2016. – 9. – №. 5. – P. 347. – doi:10.3390/en9050347.

[8] Yao, C. Transformer winding deformation diagnostic system using online high frequency signal injection by capacitive coupling./ Yao, C., Zhao, Z., Chen, Y., Zhao, X., Li, Z., Wang, Y., & Wei, G.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 21(4), 1486-1492.– DOI 10.1109/TDEI.2014.004283

[9] Islam, A. Detection of mechanical deformation in old aged power transformer using cross correlation co-efficient analysis method./Islam, A., Khan, S. I., & Hoque, A.// Energy and Power engineering, 3(04), 585. – doi:10.4236/epe.2011.34073

[10] Abeywickrama, N. Effect of core magnetization on frequency response analysis (FRA) of power transformers. / Abeywickrama, N., Serdyuk, Y. V., & Gubanski, S. M.// IEEE Transactions on Power delivery, 23(3), 1432-1438. – DOI:10.1109/TPWRD.2007.909032

[11] Alsuhaibani, S. A review of frequency response analysis methods for power transformer diagnostics. /Alsuhaibani, S., Khan, Y., Beroual, A., & Malik, N.// Energies, 9(11), 879. – doi:10.3390/en9110879

[12] Shintemirov, A. Transformer winding condition assessment using frequency response analysis and evidential reasoning. /Shintemirov, A., Tang, W. H., & Wu, Q. H.// IET Electric Power Applications, 4(3), 198-212. – doi: 10.1049/iet-epa.2009.0102

[13] Miyazaki, S. Detection and quantitative diagnosis of axial displacement of transformer winding by frequency response analysis. / Miyazaki, S., Tahir, M., & Tenbohlen, S. // IET Generation, Transmission & Distribution, 13(15), 3493-3500. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6032

[14] Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання: затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р. / ДП «ДонОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС»; розробники : Г. Шкуринський, В. Бочаров, В. Сприса – К.: Державний стандарт України, 2007. – 262 с

[15] Sebok, M. Thermal diagnostic systems and their application for analysis of transformer winding. / Sebok, M., Kucera, M., Korenciak, D., & Gutten, M. // Diagnostyka, 20(2), 49-55. – DOI: 10.29354/diag/105933

Planning of maintenance of power transformers on the results of control of their frequency characteristics

M. Hryshchuk
Vinnitsa National Technical
University,
Ukraine

O. Rubanenko
Vinnitsa National Technical
University,
Ukraine

O. Rubanenko
Vinnitsa National Technical
University,
Ukraine

On the basis of the analysis of literature sources it is shown that in the power system the power transformers (PT) – is a costly and responsible type of electrical equipment. The method of the analysis of the frequency-amplitude characteristics (AFC) is considered. The AFC method is using the results of measurements of the amplitude values of the test signal response voltage and the test signal voltage. It determines the test signal transmission coefficient at different frequencies allows us to detect the deviation of this coefficient from its normalized values at the special value of frequencies. This value of frequency permit to identify damage that allows us to substantiate the technical condition of the transformer and elements. The least-squares method, the Gauss-Markov theorem and the covariance matrix were used to statistically estimate the parameters of the regression model obtained from the measurement results. The determined regression equation provides the smallest value of the sum of squares of the deviations of the measurement results from the calculated by the regression equation. On the example of one amplitude-frequency characteristic of the investigated PT by the location, an algorithm for determining the recommended time and date for the subsequent measurements of AFC is proposed, in order to reduce the risk of emergency mode and reduce the cost of operation of the PT by increasing the number of highly informative measurements.

A limit of 5 percent deviation is also determined at the frequency information interval, to further determine the probable intersection of the graphs at certain points, such a limit, in order to predict the probable damage of the windings.

Keywords - diagnosis, technical state, power transformer, frequency-amplitude characteristics, deviation, FRA, windings, magnetic circuit, planning the day of diagnosis, forecasting.