

УДК 621.314

Беляєв В.К.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Панєнко О.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИБІР ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНОГО СТАНУ ОБМОТКИ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

У статті розглянуто метод функціональної діагностики стану обмоток силового трансформатора за зміною їх опору. Проведено порівняння трьох лінійних діагностичних моделей, що використовуються для визначення характеристик обмоток трансформатора. Описано метод оцінювання характеристик якості (похибок і чутливості) розглянутих моделей. Визначено особливості впливу похибок виміру режимних параметрів трансформатора (напруг, струмів, кутів фаз) на похибки моделей за типових режимів навантаження трансформатора. Сформовано рекомендації стосовно використання розглянутих діагностичних моделей.

Ключові слова: діагностика, модель, обмотка, опір короткого замикання, похибка, трансформатор.

Постановка проблеми. З розвитком методів виявлення пошкоджень і дефектів енергетичного обладнання поширення набувають методи безперервного контролю під робочою напругою. До них можна зарахувати контроль величини $\text{tg}(\delta)$ ізоляції трансформаторів струму та введів силових трансформаторів, контроль рівня часткових розрядів в ізоляції високовольтного обладнання, хроматографічний аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі, вимірювання рівня вібрації з метою оцінювання стану запресування обмоток, стану магнітопроводу й інші методи [1–6].

Одним із методів функціональної діагностики силових трансформаторів, що розвиваються, є метод контролю механічного стану обмоток трансформатора шляхом спостереження, під навантаженням, за зміною їх опору. Основні переваги такого підходу – в оперативності й відмові від дорогих операцій виведення з роботи та розшиновки трансформатора, що супроводжують традиційну процедуру періодичного тестового контролю (визначення опору в досліді короткого замикання (далі – к.з.) трансформатора [5]).

Для реалізації цього методу необхідно створення системи автоматизованої реєстрації параметрів робочого режиму трансформатора з подальшим розрахунком контрольованих параметрів обмотки (наприклад, опору) та їх оцінюванням. До параметрів режимів, що реєструються, належать фазні струми й напруги на входах нормально працюючого трансформатора, зсув фаз між ними.

Методика визначення опору залежить від характеру вимірюваних величин: за масивом зафіксованих миттєвих значень, за вимірними діючими значеннями (модулями) величин або за певними модулями й кутами фаз (комплексами) [2; 4; 6].

У всіх випадках для зв'язку величин, що реєструються (напруг, струмів, кутів фаз) із параметрами (характеристиками) обмоток, необхідно використовувати діагностичну математичну модель трансформатора, якість якої впливає на результати контролю. Характеристики якості використовуваної діагностичної моделі (адекватність, точність, чутливість) визначають достовірність одержуваної оцінки стану обмотки [2; 7].

У зв'язку зі складністю підтвердження адекватності отриманого результату під час контролю під навантаженням (визначені під час контролю під навантаженням величини опорів відрізняються від одержуваних у процесі тестового контролю, з огляду на істотну різницю режимів трансформатора) і досить малими значеннями допустимих відхилень контрольованих величин (відхилення опору короткого замикання до 3% [5]), вибір моделі, що використовується в системі діагностики, обов'язково повинен урахувувати зазначені характеристики якості моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для використання в методиках контролю стану обмоток трифазних трансформаторів за їх опором зазвичай використовують моделі, основані на моделі однофазного трансформатора з урахуванням

особливостей схем з'єднання обмоток і конструкції. Можуть використовуватися як повні моделі однієї фази обмотки [2], так і спрощені моделі [4; 6].

Класична модель ідеалізованого однофазного двообмоткового трансформатора як діагностичної пропонується в [2]. Модель становить трансформатор у деякому режимі роботи як чотириполісник і пов'язує напруги і струми первинної (\dot{U}_1, \dot{I}_1) і вторинної (\dot{U}_2, \dot{I}_2) обмоток невиродженою системою рівнянь у Z формі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + k \cdot R_m + j\omega L_{11}) \cdot \dot{I}_1 + (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= (R_m + j\omega M) \cdot \dot{I}_1 + (R_2 + R_m / k + j\omega L_{22}) \cdot \dot{I}_2 \\ \text{або} \quad \dot{U}_1 &= z_{11} \cdot \dot{I}_1 + z_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= z_{21} \cdot \dot{I}_1 + z_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1)$$

де R_1, R_2 – активні опори первинної і вторинної обмоток, L_{11}, L_{22} – повні власні індуктивності обмоток, M – взаємна індуктивність обмоток, R_m – активний складник опору взаємної індукції, k – відношення числа витків первинної і вторинної обмоток.

Усі індуктивні елементи моделі та R_m визначаються основним потоком у магнітопроводі трансформатора й тому нелінійні (істотно залежать від інтенсивності процесів).

Для визначення чотирьох невідомих коефіцієнтів при струмах $z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}$ необхідно провести вимірювання напруг і струмів у двох різних режимах навантаження (два досліди), припускаючи, що коефіцієнти залишаються незмінними в цих режимах. З огляду на вплив нелінійності характеристики намагнічування на шукані величини, режими роботи трансформатора у двох дослідів повинні відрізнятися несуттєво. Отримані при цьому рівняння розглядаються як системи лінійних алгебраїчних рівнянь (далі – СЛАР). Об'єднуючи системи рівнянь для двох дослідів, запишемо СЛАР:

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{U}, \quad (2)$$

де $\mathbf{Z} = [z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}]^T$; $\mathbf{U} = [\dot{U}_{11}, \dot{U}_{12}, \dot{U}_{21}, \dot{U}_{22}]^T$, у напруг перший індекс показує номер обмотки, другий – номер дослідів; \mathbf{I} – заповнена квадратна матриця (4x4), що містить струми обмоток в 1 і 2 дослідів (індексація струмів аналогічна напругам). Розв'язуючи систему (2), знаходимо коефіцієнти $z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}$, за якими можна визначити основні параметри трансформатора, що характеризують його технічний стан, зокрема шуканий опір к.з.

Основні проблеми під час використання повної діагностичної моделі для визначення характеристик обмоток пов'язані з поганою обумовленістю системи рівнянь моделі при реальних значеннях вхідних у рівняння величин (рішення нестійкі) [2].

Для підвищення стійкості рішень у [7] запропоновано використовувати один із найбільш ефективних (у плані забезпечення точності та стійкості) метод регуляризації Тихонова в модифікації із завданням наближеного рішення (Z0). У цьому випадку задача розв'язку рівнянь моделі (2) зводиться до розв'язку системи такого вигляду:

$$[\mathbf{I}^* \cdot \mathbf{I} + \alpha \cdot \mathbf{E}] \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{I}^* \cdot \mathbf{U} + \alpha \cdot \mathbf{Z}_0, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт регуляризації, \mathbf{I}^* – ермітова сполучена матриця струмів \mathbf{I} .

У роботі використано модель із коефіцієнтом регуляризації $\alpha=0,05$.

Унаслідок складнощів, що виникають під час застосування повної моделі трансформатора, часто застосовуються спрощені моделі. Найбільшого розповсюдження набула модель, побудована на основі Г-подібної схеми заміщення трансформатора [2; 4; 6]. У моделі вводиться припущення про рівність струму, що протікає по первинній обмотці, приведеному струму вторинної (в термінах повних моделей $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 / k$). Це наближення дає змогу оцінювати опір z_c , використовуючи результати вимірів струму тільки з боку однієї з обмоток і проводячи тільки один дослід:

$$z_c = (\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2) / \dot{I}_1. \quad (4)$$

Загальні питання точності, адекватності й чутливості діагностичних моделей трансформатора розглянуто в роботі [7], де запропоновано методи розрахунку якісних характеристик моделей.

Постановка завдання. Мета статті – розроблення рекомендацій щодо застосування діагностичних моделей для контролю деформації обмоток трансформатора під навантаженням з урахуванням їх якісних характеристик і визначення необхідної точності реєстрації параметрів режиму під час використання зазначених моделей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для контролю стану обмотки придатні декілька величин, які можуть бути визначені за допомогою діагностичної моделі.

Повні індуктивності в (1) можна виразити через індуктивності розсіювання обмоток L_1 і L_2 :

$$\begin{aligned} L_{11} &= L_1 + M \cdot k, \quad L_{22} = L_2 + M / k; \quad z_1 = (R_1 + j\omega L_1), \\ z_2 &= (R_2 + j\omega L_2). \end{aligned}$$

Індуктивності розсіювання вважаються незалежними від магнітних властивостей магнітопроводу, визначаються в основному конструкцією обмоток і не залежать від режиму роботи трансформатора.

У разі деформації обмоток змінюються їх потокозчеплення розсіювання, тобто змінюються індуктивності розсіювання. Розділити потоки роз-

сіювання пари обмоток реального трансформатора неможливо, тому використання під час контролю індуктивності розсіювання окремих обмоток L_1 і L_2 недоцільне, незважаючи на їх окремих облік у моделях. Водночас відомо, що комбінація $L_1+k^2 \cdot L_2$ безпосередньо пов'язана з геометричними розмірами, взаємним становищем котушок та енергією сумарного поля розсіювання. З огляду на сказане, контрольованим параметром доцільно вибирати або зазначену комбінацію, або безпосередньо пов'язану з нею.

Величину $X_c=\omega(L_1+k^2 \cdot L_2)$ часто називають індуктивним опором к.з., хоча вираз реактивного складника (X_k) опору z_k , що визначається за формулою досліду к.з., відрізняється від X_c :

$$z_k = z_1 + k^2 z_2 \cdot fm = (R_1 + k^2 R_2) fm + j\omega \cdot (L_1 + k^2 L_2 \cdot fm) = R_k + jX_k$$

$$fm = 1 / \sqrt{1 + k^2 z_2 / z_m}, \quad z_m = k(R_m + j\omega M). \quad (5)$$

Множник f_m визначає залежність від магнітних властивостей магнітопроводу, тобто залежність від режиму роботи трансформатора, при якому здійснювався контроль. Незважаючи на те що значення f_m мало відрізняється від одиниці, під час оцінювання похибки потрібно враховувати наявність цієї залежності.

У роботі розглядаються випадки використання під час контролю як величини z_k (яка визначається згідно з (5), як для досліду к.з.), так і повного приведення опору розсіювання z_c :

$$z_c = z_1 + k^2 z_2 = (R_1 + k^2 R_2) + j\omega(L_1 + k^2 \cdot L_2) = R_c + jX_c \quad (6)$$

Через малість активних складників z_k і z_c і близькість до одиниці f_m гранично допустимим значенням зміни можливих діагностичних параметрів (z_k, z_c, X_k, X_c) варто вважати ті самі 3%, що й для тестової діагностики.

Показники точності й чутливості моделі.

Під загальною похибкою моделі мається на увазі помилка апроксимації моделлю модуля опору z (z_c або z_k), яка визначалася як різниця модулів розрахункового й опорного («істинного») значення z_b (відповідно, z_{cb} або z_{kb}). Загальна похибка залежить від структури та параметрів моделі, що використовується, від режиму роботи трансформатора, при якому визначається опір, від похибки визначення вхідних змінних (напруг, струмів, кутів фаз).

Загальну похибку моделі ($D\Sigma z$) подаємо як суму двох складників: складника Dz , зумовленого похибками визначення (вимірювання) вхідних змінних, і складника Doz – визначається за відсутності похибки вхідних змінних:

$$D\Sigma z = Dz + Doz, \quad D\Sigma z = \frac{|z| - |z_b|}{|z_b|}, \quad Dz = \frac{|z| - |z_o|}{|z_b|},$$

$$Doz = \frac{|z_o| - |z_b|}{|z_b|},$$

де $z=z_k, z_c$ – розрахункові опори, визначені з використанням діагностичних моделей; $z_b = z_{kb}, z_{cb}$ – опорні значення z_k, z_c , які в разі математичного моделювання визначаються згідно з (5) або (6) при прийнятих параметрах трансформатора $R_1, R_2, L_1, L_2, z_m, z_o=z_{ko}, z_{co}$ – опори, визначені з використанням діагностичних моделей за відсутності похибки вхідних величин.

Похибка Doz характеризує адекватність моделі, тобто повноту подання цієї моделлю властивостей об'єкта для мети дослідження. Вона показує мінімальну похибку визначення опору в розглянутому режимі з використанням цієї моделі.

Інший показник якості моделі, використаний у роботі, – чутливість вихідної величини до зміни вхідних величин моделі (напруги, струми, кути фаз) [7]. Чутливість до зміни кожної i -ї вхідної величини окремо характеризують безрозмірними коефіцієнтами bz_i . Коефіцієнти чутливості пов'язують похибку визначення (вимірювання) вхідної величини (δ_i) з похибкою розрахунку Dz , зумовленою похибками вимірювань:

$$Dz = \frac{|z| - |z_o|}{|z_b|} = \sum_i bz_i \cdot \delta_i,$$

$$bz_i = \frac{|z| - |z_o|}{p_i - p_{io}} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_b|} = \frac{\Delta|z|}{\Delta p_i} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_b|}, \quad \delta_i = \frac{p_i - p_{io}}{p_{ib}},$$

де p_i – значення i -ї вхідної величини, при якій отримуємо оцінку $|z|$; p_{io} – значення i -ї величини, при якій отримано оцінку $|z_o|$; p_{ib} – опорне значення i -ї вхідної величини для розрахунку коефіцієнтів і похибки; δ_i – похибка вимірювання i -ї величини у відносних одиницях.

Під час оцінювання чутливості до похибки модулів приймаємо $p_{ib}=p_{io}$ і коефіцієнти безрозмірні, а в разі похибки кутів фаз, що задається в ел. градусах, приймаємо $p_{ib}=1$, при цьому коефіцієнти отримуємо з розмірністю 1/градус. У разі малих похибок вхідних величин моделі коефіцієнти визначаються через похідні за відповідною величиною:

$$bz_i = \frac{\partial|z|}{\partial p_i} \cdot \frac{p_{ib}}{|z_b|}.$$

Методика розрахунку похибки й чутливості.

Під час розрахунку коефіцієнтів чутливості враховувався розмах можливих варіацій (зумовлених похибкою) вхідних величин моделі.

У разі малих похибок оцінювання коефіцієнтів чутливості опору $z_k=f(Z)$ для повних моделей проходила згідно з таким виразом (аналогічно для інших величин, наприклад, z_c):

$$\frac{\partial |z_k|}{\partial p_i} = |z_k| \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{1}{z_k} \cdot \frac{\partial z_k}{\partial p_i} \right),$$

$$\frac{\partial z_k}{\partial p_i} = -\frac{\partial f(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} \cdot \mathbf{I}^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \cdot \mathbf{Z} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial p_i} \right). \quad (7)$$

Для розрахунку коефіцієнтів моделі (3) з регуляризацією СЛАР використано вирази, отримані в [7]:

$$\frac{\partial z_k}{\partial p_i} = -\frac{\partial f(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} \cdot \mathbf{I}^{-1} \cdot \left(\left(\left(\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \right)^* \cdot \mathbf{I} + \mathbf{I}^* \cdot \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial p_i} \right) \cdot \mathbf{Z} - \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial p_i} \right). \quad (8)$$

Для спрощеної моделі (4) коефіцієнти чутливості записуємо в явному вигляді (для модулів безрозмірні, для кутів фаз – 1/градус):

$$bz_{|U_1|} = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \quad bz_{|U_2|} = -\operatorname{Re} \left(\frac{k \cdot \dot{U}_2}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \quad (9)$$

$$bz_{\phi u1} = \operatorname{Re} \left(j \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right), \quad bz_{\phi u2} = -\operatorname{Re} \left(j \frac{k \cdot \dot{U}_2}{\dot{U}_1 - k \cdot \dot{U}_2} \right),$$

$$bz_{\phi i1} = 0 \quad j = \sqrt{-1}$$

У разі великих похибок вхідних величин коефіцієнти визначалися прямим розрахунком через відношення приростів вихідної та вхідної величин.

Моделювання режимних параметрів. Під час розрахунку чутливості й похибок необхідно знати значення характерних для експлуатації режимних параметрів (напруги, струми, кути фаз). Ці значення отримували з використанням лінійної математичної моделі, яка дає змогу імітувати результати вимірювання перших гармонік напруги, струму, зсуву фаз на виходах обмоток трансформатора конкретного типу, що працює в заданому режимі, типовому для його нормальної експлуатації [8]. Для визначення комплексів напруги і струму обмоток спільно вирішуються рівняння (1) в А-формі чотиріполюсника й рівняння зовнішньої характеристики трансформатора (зв'язок зміни напруги на обмотці з боку навантаження зі струмом навантаження в режимі, близькому до номінального). В одержувані значення модулів і кутів фаз можуть уноситися спотворення, що імітують похибки вимірювання. Отримані так значення розглядалися як результати досліду вимірювання режимних параметрів трансформатора з характеристиками обмоток фази $R_1, R_2, L_1, L_2, R_m, M$, що працює в режимі з навантаженням заданою потужністю S і заданим $\cos(\varphi)$.

Результати розрахунків і порівняння моделей. Оцінювання проводилися для діагностичних моделей різних трансформаторів, що істотно відрізняються за потужністю й напругою, результати наведені для двох трансформаторів (ТДЦ 400МВА 330кВ і ТРДЦ 63МВА 110кВ). Модуль потужності навантаження змінювався в межах 1–0,65 від номінальної і $\cos(\varphi)$ у межах 0,95–0,6. Зазначеному діа-

пазону змін потужності й косинуса відповідали такі зміни режимних параметрів (отримані за названою вище математичною моделлю): значення модуля U_1 відрізнялися від номінального на 0,1–0,5%; U_2 – на 4–7%; струми I_1 і I_2 змінювалися в межах від 67% до 111% номінального значення. Найбільші зміни зсуву фаз спостерігалися між напругами U_1 і U_2 – в межах 0,045–0,1 ел. градуса. Результати оцінювання похибки й чутливості наведені нижче.

Похибка, що характеризує адекватність моделі. За відсутності похибки вимірювань ($\delta=0$) похибка Doz повної моделі (2) в дослідженні визначається тільки похибкою обчислень (так як опори фактично визначаються рівняннями «істинної» діагностичної моделі, тобто моделі, що відповідає математичній моделі об'єкта), становлячи не більше ніж 10-9%. У разі моделі (3) з регуляризацією СЛАР цей складник похибки виявляється також несуттєво малим (<10-6%).

Для спрощеної моделі (4) похибка Doz значно більша й у разі зміни навантаження у вищевказаних межах змінювалася від 0,14% до 0,375%. Більше значення похибки (0,375%) відповідає меншим значенням потужності й косинуса навантаження (0,65 номінальної потужності й 0,6 відповідно).

Відмінності відносних значень похибки адекватності (Doz) для розглянутих трансформаторів в однакових режимах роботи незначні.

Похибка моделі, викликана похибкою вимірювань. Під час аналізу похибки Dz ділянка можливих похибок вхідних величин діагностичних моделей (режимних параметрів) визначалася, виходячи з похибки доступних в експлуатації засобів вимірювальної техніки (вимірювальні трансформатори класу точності 0,5 і 1, кутова похибка 0,3–0,5 ел. градуса). Звідси ділянка похибок вимірювань, що цікавить, для модулів сигналів – до 1%, для фазних кутів – до 0,5 ел. градуса. Зазначені максимальні значення похибок вимірювань параметрів під час аналізу чутливості необхідно розглядати як великі похибки, контролюючи можливість застосування коефіцієнтів, визначених за похідними.

Значення коефіцієнтів bz_i (малі похибки) досліджених моделей, розраховані за (7) – (9) для характерного режиму роботи трансформаторів, наведені в таблиці 1 (характерний режим: для двох дослідів різниця потужності навантаження в досліді становила $\approx 1\% : 0,9$ і $0,91$ номінальної, при однакових косинусах – 0,8).

При коефіцієнтах bz_i з різними знаками в досліді однаковий для двох дослідів складник похи-

Розраховані коефіцієнти чутливості для випадку малих похибок

Трансф.	Модель	Величина	№ досліду	Коеф. для модуля (без. розмірн.)				Коеф. для кута фаз (1/градус)		
				U_1	U_2	I_1	I_2	j	j	j
ТРДЦ 63 МВА	(2)	z_c	1	-579	498	40,8	40,5	-9,81	9,87	-0,02...0,035
			2	580	-497	-41,3	-41,0	9,81	-9,87	0,02...0,035
		z_k	1	-537	458	78,8	0,0	-9,88	9,87	<5,6Ч
			2	538	-458	-79,8	0,0	9,88	-9,87	-5,6Ч
	(3)	z_c	1	0,52	-0,42	-0,05	-0,05	0,014	-0,013	-1,5Ч
			2	6,26	-5,35	-0,46	-0,45	0,11	-0,11	<2,0Ч
		z_k	1	0,73	-0,62	-0,11	0,0	0,013	-0,013	<10 ⁻⁵
			2	6,05	-5,15	-0,90	0,0	0,11	-0,11	<10 ⁻⁵
	(4)	z_c	1	6,84	-5,84	-1	0	0,125	-0,125	0
	ТДЦ 400 МВА	(2)	z_c	1	-545	464	40,6	40,4	-9,44	9,50
2				545	-463	-41,1	-40,9	9,44	-9,50	0,03...0,034
z_k			1	-502	424	78,4	0,0	-9,50	9,50	<3,4Ч
			2	503	-424	-79,4	0,0	9,50	-9,50	-3,4Ч
(3)		z_c	1	-2,22	1,91	0,16	0,15	-0,033	0,034	-3,3Ч
			2	8,55	-7,24	-0,65	-0,65	0,15	-0,15	<3,4Ч
		z_k	1	-1,80	1,52	0,28	-10 ⁻³	-0,034	0,034	(-1...2.3)10 ⁻⁵
			2	8,14	-6,86	-1,28	-10 ⁻³	0,15	-0,15	-4,5Ч
(4)		z_c	1	6,43	-5,43	-1	0	0,121	-0,121	0

бок δ_i призводить до виникнення меншої похибки визначення $|z|$, ніж така ж за значенням δ , але що діє в одному досліді. Для моделі (2) Dz виникає в основному в результаті відмінності похибок у досліді.

Для розглянутих моделей притаманні такі закономірності залежностей Dz і чутливості від величини похибки δ (типова ситуація $\delta_{i,1} \neq \delta_{i,2}$): – для всіх моделей на Dz найбільше впливають похибки модуля й кута фаз напруги; – у випадках $\delta_{i,1} \neq \delta_{i,2}$ і для спрощеної моделі залежності завжди лінійні; – сильна нелінійність характерна для моделей із нерегуляризованою СЛАР; – модель із регуляризацією (3) характеризується для напруг лінійною залежністю Dz , а для струмів – або нелінійною залежністю з обмеженим значенням Dz (при розрахунку $|z_c|$), або нелінійною залежністю з необмеженим ростом Dz (при розрахунку $|z_k|$).

У разі зміни параметрів режиму трансформатора в розглянутому діапазоні розмах зміни коефіцієнтів bz_i досліджуваних моделей приблизно

однаковий: для модулів напруг – 90...110% середнього значення, для модулів струму – 1...15%, для значних за величиною ($>10^{-4}$) коефіцієнтів кутів фаз – 100...150%. Менші значення коефіцієнтів для модулів напруг спостерігаються при більшій потужності й більшому косинусі, а для кутів фаз – при більшій потужності й меншому косинусі.

Значний інтерес становить залежність Dz від відхилення параметрів режимів трансформатора у двох досліді. У разі збільшення відмінності в режимах коефіцієнти bz_i моделі (2) за модулем зменшуються, зближуючись (не стаючи меншими) зі значеннями для моделі (3). Зростання різниці модуля потужності навантаження від 1% до 10% (приблизно така сама різниця модулів струмів) призводить до зменшення bz_i приблизно в 10 разів (1% (див. таблицю 1)), залежність Dz від δ стає близькою до лінійної. Але й коефіцієнти чутливості, і похибка Dz моделі (2) залишаються в кілька разів більшими за відповідні значення інших моделей. Аналогічна поведінка

характеристик моделі (2) в разі збільшення різниці в $\cos(\varphi)$ дослідів.

Для моделі (3) коефіцієнти чутливості b_z збільшуються в кілька разів зі зростанням відмінності потужності навантаження або $\cos(\varphi)$ від 1% (див. таблицю 1) до 10%, а в разі подальшого зростання до 25% мало змінюються.

Допустимі похибки вимірювань режимних параметрів. Оскільки допустимим значенням зміни можливих діагностичних параметрів (z_k, z_c) варто вважати 3% (відповідно до значення тестової діагностики), прийнятним результатом методики контролю можна вважати ситуацію, коли похибки вимірювань призводять до зміни контрольованої величини (діагностичного параметру) не більше ніж на 1%.

За отриманими даними виконано оцінювання (таблиця 2) допустимої похибки вимірювання режимних параметрів для гарантованого отримання похибки розрахунку модуля опору 1% (при типових умовах проведення вимірювань, таких самих, як для таблиці 1).

Під час оцінювання необхідної похибки вимірювань (таблиця 2) не розглядалася можливість одночасного впливу кількох помилок, тому вимоги до точності можуть виявитися дещо завищеними в разі похибок різного знака. Водночас ці вимоги більш оптимістичні, ніж під час оцінювання найгіршого випадку.

З огляду на клас точності загальнодоступних в експлуатації засобів вимірювальної техніки (клас точності – 0,5 або 1), для впевненого виявлення неприпустимих деформацій обмоток під час контролю під навантаженням (похибка визначення $|z_c|$ або $|z_k|$ повинна бути не гірша за 1%) необхідно або забезпечення спеціальних умов проведення контролю (наприклад, при сталості похибки вимірювань режимних параметрів або під час контролю в спеціально визначених, оптимальних, робочих режимах трансформатора), або використання спеціальних засобів вимірювання.

Оцінювання допустимої похибки виміру параметрів режиму

Модель	Величина, що контролюємо	Похибка для модуля (%)		Похибка для кута фаз (градус)	
		U	I	φ_u	φ_i
(2)	z_c, z_k	<0,002	<0,025	<0,0005	<0,3
(3)	z_c	0,161	2	0,08	-
	z_k	0,165	<0,12	0,08	0,08
(4)	z_c	0,151	1	0,08	

Висновки. Модель на основі СЛАР без регуляризації (2) варто використовувати тільки в разі рівності похибок вимірювання режимних параметрів у необхідних двох дослідях. З огляду на те що забезпечити повну ідентичність похибки вимірювань у двох дослідях на практиці проблематично, а в інших випадках модель має дуже високі значення коефіцієнтів чутливості й нелінійно зростаючу зі зростанням похибки вимірювань похибку D_z , використовувати цю модель потрібно дуже обережно.

Модель із регуляризацією СЛАР (3) може використовуватися за умови контролю величини $|z_c|$, але не $|z_k|$ (в останньому випадку за можливих похибок виміру режимних параметрів спостерігаються високі значення коефіцієнта чутливості для струму й нелінійне зростання похибки моделі). Використання цієї моделі буде найбільш доцільно з погляду досягнення найбільшої адекватності й точності результату. Додаткова можливість зниження похибки для цієї моделі – використання залежності коефіцієнтів чутливості для напруги від різниці навантаження в дослідях.

Спрощена модель (4) вимагає одного дослідю при вимірах, але має незначний адитивний складник похибки, що залежить від режиму роботи трансформатора (0,14...0,375%). Припускаючи звичайну для експлуатації точність засобів вимірювань (клас точності – 0,5 або 1), можемо констатувати, що використання цієї простої моделі може бути доцільнішим, ніж використання більш складних і адекватних моделей (2) і (3), що володіють великим потенціалом тільки за високої точності вимірювань режимних параметрів.

Список літератури:

1. Алексеев Б.А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 2010. 88 с.
2. Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Непрерывная диагностика трансформаторов. *Электричество*. 1998. № 7. С. 45–55.
3. Беляев В.К., Паненко Е.Н. Определение диэлектрических параметров изоляции трансформаторов тока при множественных измерениях в системах контроля под рабочим напряжением. *Электротехника та електромеханіка*. 2016. № 5. С. 40–46.

4. Хренников А., Нестеренко А. Диагностика силовых трансформаторов. Оценка состояния обмоток по значению сопротивления КЗ. *Новости электротехники*. 2014. № 3 (87).
5. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
6. Хоанг Ванг Нью, Малиновский В.Н. Методы и средства контроля и диагностики состояния обмоток мощных силовых трансформаторов. *Электротехника*. 2009. № 10. С. 36–41.
7. Беляев В.К., Ободовский В.Д., Паненко Е.Н. Анализ чувствительности диагностических моделей для контроля состояния обмоток трансформатора под нагрузкой. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 4. С. 81–87.
8. Паненко Е.Н. Моделирование измерений для исследования моделей параметрической идентификации силового трансформатора. *Моделирование. Идентификация. Синтез систем управления*: сборник тезисов 15 Междунар. научн. конф. Донецк: Изд. ИПММ НАН Украины. 2012. С. 97–99.

ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТКИ ПОД НАГРУЗКОЙ

В статье рассмотрен метод функциональной диагностики состояния обмоток силового трансформатора по изменению их сопротивления. Проведено сравнение трех линейных диагностических моделей, используемых для определения характеристик обмоток трансформатора. Описана методика оценки характеристик качества (погрешностей и чувствительности) рассмотренных моделей. Определены особенности влияния погрешностей измерения режимных параметров трансформатора (напряжений, токов, углов фаз) на погрешности моделей при типичных режимах нагрузки трансформатора. Сформированы рекомендации по использованию рассмотренных диагностических моделей.

Ключевые слова: диагностика, модель, обмотка, сопротивление короткого замыкания, погрешность, трансформатор.

SELECTION OF TRANSFORMER DIAGNOSTIC MODEL FOR MONITORING SYSTEM OF THE MECHANICAL CONDITION OF WINDING UNDER LOAD

The method of functional diagnostics of the state of the power transformer windings based on the change in their short circuit resistance were considered. Three linear diagnostic models used to determine the characteristics of the transformer windings were compared. The methods for evaluation of the quality characteristics (inaccuracy and sensitivity factors) of the considered models are described. The features of the influence of measurement errors of regime parameters on model errors, with typical transformer operating modes close to the nominal mode, are determined. Recommendations on the use of the considered diagnostic models were formed.

Key words: diagnostics, error, model, short circuit resistance, transformer, winding.