

УДК 621.314.2: 681.518.5

В. В. Грабко, д. т. н., проф.;

Д. О. Березницький, асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ РЕСУРСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ В РЕЖИМІ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє визначити допустимий термін роботи трансформатора в режимі перевантаження без зменшення загального терміну його експлуатації за відомими температурою навколишнього середовища, рівнем перевантаження та значенням навантаження, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження. Побудовано ресурсну характеристику трансформатора типу ТСГЛ та показано її застосування.

Постановка задачі

Відомо, що ізоляція будь-якого електроенергетичного обладнання в процесі роботи змінює свої властивості під дією температурних впливів [1]. Така ж проблема має місце і під час експлуатації силових трансформаторів. Нормативні документи вказують, що термін експлуатації трансформаторів складає 10...20 років, якщо ізоляція експлуатувалась за умови допустимих перегрівів для відповідного класу ізоляції. Але в разі перевищення допустимих робочих температур термін експлуатації зменшується в залежності від інтенсивності перегріву. В роботі [2] зазначається, що за умови забезпечення певних режимів експлуатації, які передбачають роботу трансформаторів з температурами обмоток менше допустимих, трансформатори можуть короткочасно працювати з перевантаженням без зменшення терміну служби. Зокрема, для трансформаторів типу ТСГЛ потужністю 630—2500 кВА з ізоляцією “Geafol” наведені графіки, які характеризують тривалість t допустимого перегріву ізоляції в залежності від температури навколишнього середовища T , інтенсивності перевантаження P^* та рівня навантаження P , який мав місце безпосередньо перед перевантаженням. Як приклад, на рис. 1 показано графіки для температури навколишнього середовища $T = 10^\circ\text{C}$.

Очевидно, що для фіксованого значення температури навколишнього середовища $T = 10^\circ\text{C}$ та різних значень перевантаження $P^* = 15...400\%$ і навантаження силового трансформатора, яке мало

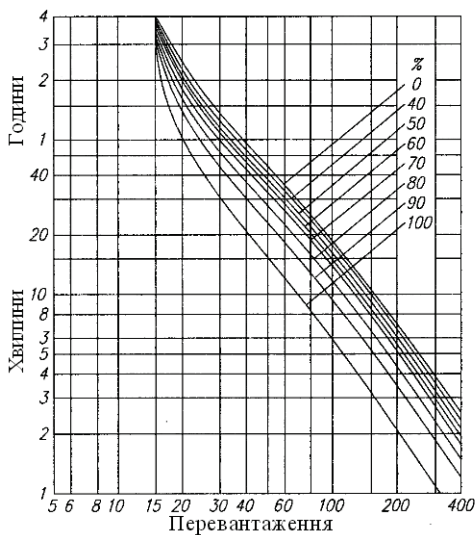


Рис. 1. Графіки залежностей $t = f(P^*, P)$ при $T = 10^\circ\text{C}$

місце безпосередньо перед моментом перевантаження, $P = 0...100\%$, тривалість перевантаження t приймає значення від однієї до 240 хвилин в залежності від співвідношення вказаних параметрів без зменшення терміну експлуатації трансформатора. Слід зазначити, що в роботі [2] наводяться й інші сукупності залежностей для температури навколишнього середовища 20, 30 та 40°C .

Аналізуючи подані залежності, можна зробити висновок, що при підвищенні температури навколишнього середовища термін експлуатації трансформатора в області допустимої роботи буде зменшуватись. Виникає питання, як здійснювати розрахунок часу експлуатації трансформатора в режимі перевантаження, якщо параметри — значення перевантаження, навантаження силового трансформатора, яке мало місце безпосередньо перед моментом перевантаження, та температура навколишнього середовища не співпадають з наведеними графіками.

Для безпечної експлуатації трансформатора без зниження терміну експлуатації та надійності роботи необхідно розробити математичну модель, яка дозволяла б знаходити тривалість перевантаження трансформатора для будь-яких допустимих комбінацій значень вхідних параметрів, що і є метою даної роботи.

Алгоритм розв'язання задачі

Оскільки залежності, показані на рис. 1, характеризують ресурсну характеристику трансформатора тільки у вказаних точках, то для визначення інших значень цієї характеристики необхідно отримати її в аналітичному вигляді.

Пропонується такий спосіб розв'язання задачі.

Представимо залежності (рис. 1) у вигляді таблиці даних.

t (хв) при T = 10 °C													
P*(%)	15	20	30	40	50	60	80	100	150	200	300	400	
P(%)	0	240	160	80	56	44	35	25	18	10	7	3,9	2,7
40	230	150	74	53	40	33	23	17	9,5	6,2	3,6	2,4	
50	220	125	68	50	37	30	21	16	9	5,6	3,2	2,2	
60	210	120	62	46	34	28	19	15	8	5,1	2,9	2	
70	200	100	59	43	31	26	18	14	7	4,8	2,6	1,9	
80	190	95	54	37	28	23	15	12	6	4,2	2,3	1,6	
90	185	85	45	31	24	18	13	9	5	3,3	1,8	1,3	
100	180	65	32	22	15	12	8	5,5	3	2	1,1	0,5	

Очевидно, що ці значення можна зобразити графічно у тривимірному вигляді. Побудована поверхня у вигляді сукупності кривих буде характеризувати поле допустимих термінів експлуатації трансформатора при температурі навколишнього середовища T = 10 °C. Підкреслимо, що отримана поверхня має пройти через задані точки ресурсної характеристики. Графічна інтерпретація табличних даних показана на рис. 2.

Пропонуємо підхід до визначення параметрів кожної точки поверхні. Застосувавши метод найменших квадратів (МНК) [3] у поєднанні із зовнішнім критерієм Івахненко [4] для апроксимації даних, вказаних в таблиці, апроксимується кожна залежність $t = f(P^*)$ з різними фіксованими значеннями P. Для цього здійснюється спочатку гіперболічна нормалізація даних (табл.) за добутком (tP^*) з найбільшим часом експлуатації трансформатора в режимі перевантаження за формулою

$$tP^* = 3600 \tag{1}$$

або $t/60 = 60/P^*$. (2)

Розглядаються гіперболічно нормалізовані обернені функції

$$t' = a_0 + a_1P^{*'} + a_2(P^{*'})^2 + \dots + a_n(P^{*'})^n, \tag{3}$$

де n — порядок апроксимувального полінома.

У відповідності з ідеєю МНК у поєднанні із зовнішнім критерієм Івахненко, в середовищі Mathcad 7 Pro [5] розраховуються залежності типу (3) для відомих значень P = 0...100 %. В результаті отримано залежності:

а) для P = 0 % — $t' = -7,614 \cdot 10^{-3} + 0,39P^{*'} + 0,176(P^{*'})^2 - 5,37 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3;$ (4)

б) для P = 40 % — $t' = -0,014 + 0,391P^{*'} + 0,137(P^{*'})^2 + 1,722 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3;$ (5)

в) для P = 50 % — $t' = -0,082 + 0,655P^{*'} - 0,116(P^{*'})^2 + 0,047(P^{*'})^3;$ (6)

г) для P = 60 % — $t' = -0,067 + 0,568P^{*'} - 0,084(P^{*'})^2 + 0,041(P^{*'})^3;$ (7)

д) для P = 70 % — $t' = -0,119 + 0,761P^{*'} - 0,267(P^{*'})^2 + 0,073(P^{*'})^3;$ (8)

е) для P = 80 % — $t' = -0,097 + 0,629P^{*'} - 0,206(P^{*'})^2 + 0,063(P^{*'})^3;$ (9)

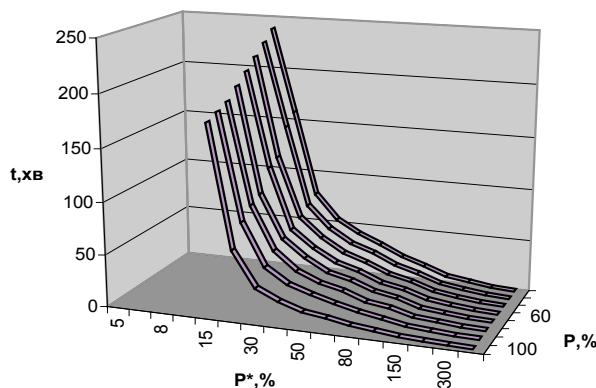


Рис. 2. Тривимірна залежність $t = f(P^*, P)$ при T = 10 °C

$$\text{ж) для } P = 90 \% \text{ — } t' = -0,097 + 0,589P^{*'} - 0,242(P^{*'})^2 + 0,073(P^{*'})^3; \quad (10)$$

$$\text{з) для } P = 100\% \text{ — } t' = -0,117 + 0,605P^{*'} - 0,365(P^{*'})^2 + 0,102(P^{*'})^3. \quad (11)$$

Зрозуміло, що побудувати кожен складову ресурсної характеристики можна, враховуючи співвідношення (2).

Для того, щоб отримати співвідношення $t = f(P^*)$ для будь-яких значень параметра P , що не входить в табл. 1, апроксимуємо аналогічним чином залежності $t = f(P)$ в середовищі Mathcad 7 Pro для різних P^* . Необхідні для такої апроксимації послідовності даних формуються шляхом підстановки вибраних допустимих значень P^* в формули (4)—(11).

Наприклад, для $P^* = 70\%$ співвідношення $t = f(P)$ матиме вигляд

$$t = 27,14 - 0,1P + 2,741 \cdot 10^{-3}P^2 - 3,259 \cdot 10^{-5}P^3. \quad (12)$$

Підставляючи в отримані сукупності залежностей $t = f(P)$ необхідне значення P , нескладно обчислити відповідні набори даних, апроксимуючи які можна отримати додаткову формулу типу $t = f(P^*)$ яка не входить у вирази (4)—(11).

Таким чином будується ресурсна характеристика тривимірної поверхні виду $t = f(P^*, P)$ силового трансформатора з фіксованим значенням температури навколишнього середовища (в даному випадку $T = 10^\circ\text{C}$).

Тепер у разі виникнення перевантаження силового трансформатора, за відомим робочим навантаженням, яке мало місце безпосередньо перед початком перевантаження, легко визначити за викладеним підходом співвідношення $t = f(P^*)$ для заданого P та за цим співвідношенням, з урахуванням відомого значення P^* , знайти величину t .

Як зазначалось вище, в [2] наведені також ресурсні характеристики роботи силового трансформатора в режимі перевантаження, побудовані для $T = 20^\circ\text{C}$, 30°C та 40°C .

Очевидно, що застосовуючи викладений підхід, легко отримати математичні вирази, що характеризують поверхні для інших значень температури навколишнього середовища.

Але задача визначення допустимого часу перевантаження силового трансформатора ускладнюється тим, що температура навколишнього середовища може приймати не лише значення, вказані в паспорті силового трансформатора, а й будь-які інші з допустимого діапазону.

Тому для отримання достовірного результату з урахуванням реальної температури навколишнього середовища необхідно запропоновану процедуру побудови ресурсної характеристики виконати двічі, тобто для двох різних площин з температурами навколишнього середовища T_1 та T_2 , між якими знаходиться фактичне значення T , потрібно обчислити допустимі терміни експлуатації трансформатора в режимі перевантаження t_{T_1} та t_{T_2} , за якими, використовуючи відому формулу ділення відрізка в певному відношенні, знаходимо фактичний час можливої роботи трансформатора

$$t^* = \frac{(t_{T_2} - t_{T_1})T + t_{T_1}T_2 - t_{T_2}T_1}{T_2 - T_1}. \quad (13)$$

За координатами цієї точки визначається реальне значення терміну ввімкнення силового трансформатора в режимі перевантаження з урахуванням наявних на даний момент значень T , P , P^* .

Приклад визначення тривалості роботи силового трансформатора в режимі перевантаження

Сформулюємо задачу, яку необхідно розв'язати. Припустимо, що в процесі роботи силового трансформатора, який мав навантаження 75 % при температурі навколишнього середовища 16°C , виник режим перевантаження на 35 %.

Необхідно визначити, скільки часу трансформатор може працювати в такому режимі без зменшення загального терміну його експлуатації.

Оскільки $T = 16^\circ\text{C}$ і це значення знаходиться між ресурсними площинами з температурами 10°C та 20°C , знайдемо спочатку залежності $t = f(P^*)$ для навантаження $P = 75\%$ та вказаних температурних площин. Для їх побудови скористаємось математичними виразами (4)—(11), які описують залеж-

ності $t = f(P^*)$ при $T = 10\text{ }^\circ\text{C}$. Також отримуємо в середовищі Mathcad 7 Pro аналогічні залежності для $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, які мають вигляд

$$\text{а) для } P = 0\% \text{ — } t' = -0,025 + 0,497P^{*'} + 0,065(P^{*'})^2 - 5,934 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (14)$$

$$\text{б) для } P = 40\% \text{ — } t' = -0,027 + 0,452P^{*'} + 0,062(P^{*'})^2 - 4,6 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (15)$$

$$\text{в) для } P = 50\% \text{ — } t' = -0,031 + 0,4332P^{*'} + 0,046(P^{*'})^2 - 1,798 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (16)$$

$$\text{г) для } P = 60\% \text{ — } t' = -0,038 + 0,416P^{*'} + 0,029(P^{*'})^2 + 1,1 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (17)$$

$$\text{д) для } P = 70\% \text{ — } t' = -0,048 + 0,368P^{*'} + 5,362 \cdot 10^{-4}(P^{*'})^2 + 6,491 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (18)$$

$$\text{е) для } P = 80\% \text{ — } t' = -0,018 + 0,21P^{*'} + 0,03(P^{*'})^2 + 5,51 \cdot 10^{-3}(P^{*'})^3; \quad (19)$$

$$\text{ж) для } P = 90\% \text{ — } t' = -0,101 + 0,31P^{*'} - 0,101(P^{*'})^2 + 0,024(P^{*'})^3; \quad (20)$$

$$\text{з) для } P = 100\% \text{ — } t' = -0,117 + 0,605P^{*'} - 0,365(P^{*'})^2 + 0,102(P^{*'})^3. \quad (21)$$

Підставляючи в формули (4)—(11) та (14)—(21), з урахуванням умови (2), значення $P^* = 35\%$, отримуємо послідовності точок, апроксимуючи які знайдемо дві залежності типу $t = f(P)$ у вигляді поліномів

$$\text{а) для площини } T = 10\text{ }^\circ\text{C} \text{ — } t = 69,181 - 0,053P - 2,877 \cdot 10^{-3}P^2 - 1,211 \cdot 10^{-5}P^3; \quad (22)$$

$$\text{б) для площини } T = 20\text{ }^\circ\text{C} \text{ — } t = 59,365 - 0,201P + 3,474 \cdot 10^{-3}P^2 - 5,823 \cdot 10^{-5}P^3. \quad (23)$$

Підставимо в вирази (22) та (23) значення $P = 75\%$ та знайдемо відповідні тривалості допустимого часу роботи $t_{T_1} = 44$ хв. та $t_{T_2} = 39$ хв.

Введемо всі відомі параметри в формулу (13) та отримуємо шукане значення $t^* = 41$ хв. допустимого терміну експлуатації силового трансформатора в режимі перевантаження без збільшення терміну його експлуатації.

Аналогічним чином можна отримати будь-яку іншу робочу точку за ресурсною характеристикою силового трансформатора, що працює в режимі перевантаження, з різними допустимими значеннями вхідних параметрів.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель побудови ресурсних характеристик силового трансформатора, що працює в режимі перевантаження.

2. Отримана ресурсна характеристика трансформатора типу ТСГЛ потужністю 630–2500 кВА з ізоляцією “Geafol” та на конкретному прикладі показано її застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голоднов Ю. М. Контроль за состоянием трансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 88 с., ил.
2. Технический каталог. Трансформаторы. — ОАО «Укрэлектроаппарат», 2007. — 82 с.
3. Турчак Л. И. Основы численных методов: Учеб. пособие. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 320 с.
4. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования. — К.: Наук. думка, 1985. — 216 с.
5. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. — М.: Нолидж, 1998. — 352 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 12.02.08
Рекомендована до друку 25.02.08

Грабо Володимир Віталійович — завідувач кафедри, **Березницький Дмитро Олександрович** — аспірант.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, Вінницький національний технічний університет