

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЬОВИХ ЗУСИЛЬ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

**Р.А. Ставинський**, кандидат технічних наук, доцент

**О.М. Циганов**, асистент

Миколаївський державний аграрний університет

*Розглянуто зусилля, які виникають у зв'язку із дією складних динамічних електромеханічних процесів в обмотках трансформатора при короткому замиканні (КЗ). Запропоновано методику розрахунку статичних осьових зусиль.*

**Ключові слова:** коротке замикання, електромагнітні сили, осьові зусилля.

**Постановка проблеми.** Забезпечення електродинамічної стійкості при КЗ та інших електродинамічних впливах лишається однією з гострих проблем сучасного трансформаторобудування. Це переважно стосується потужних трансформаторів, в яких зусилля, які виникають при КЗ, великі, а навантаження на пресуючі елементи конструкції наближаються до гранично допустимих значень.

Проблема розрахунку осьових зусиль при аварійних коротких замиканнях в трансформаторах є досить актуальною і потребує вирішення.

В роботі [1] наведено методики розрахунку осьових зусиль силових трансформаторів. В роботі [2] розглянуто дію електромагнітних сил на цілісність обмоток та ізоляційних матеріалів. Наведені методики розрахунку електродинамічної стійкості (насамперед розрахунок осьових зусиль в обмотках) мають не досить прогнозований ефект. Це підтверджується збільшенням запасу міцності, який закладається в конструкції та невіправданим підвищенням габаритів та маси трансформаторів. Це визвано відсутністю даних про вплив ряду конструктивних та технологічних факторів на електродинамічну стійкість трансформаторів при КЗ, що в свою чергу призводить до введення недостатньо обґрунтованих припущень в розрахункові

методики. У статі представлено методику більш простого статичного розрахунку осьових зусиль.

**Постановка завдання.** Необхідно розкрити вплив осьових зусиль стиснення обмоток на їх радіальну стійкість. З урахуванням цих зусиль можливе більш точне визначення коефіцієнтів запасу міцності, та, як наслідок, мінімізація витрат матеріалів на виготовлення пресуючих елементів кріплення.

**Методика дослідження.** На (рис.1, а) показана ідеалізована обмотка трансформатора, запресована між двома нерухомими опорами [1]. Під час короткого замикання в котушках створюються електромагнітні сили, які спричиняють осьові зусилля в обмотці. Ці зусилля діють в усіх перерізах обмотки та на опорах, викликають відповідні осьові переміщення котушок та деформацію усіх шарів ізоляції.

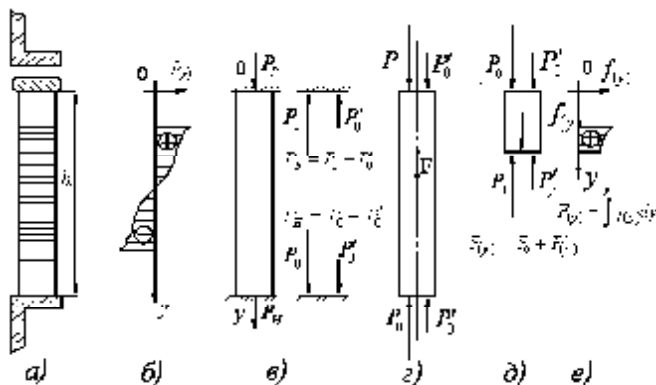


Рис.1. Розрахункова схема осьових зусиль: а – умовна обмотка; б – крива електромагнітних сил  $f_{(y)}$ ; в – розрахунковий стержень; г – схема зусиль для визначення рівноваги обмотки; д – дія сил на ділянці обмотки; е – інтегральна сили, що діє на ділянці обмотки

Задачами розрахунку механічної схеми є:

- 1) визначення сил на верхніх  $P_g$  та нижніх  $P_n$  опорах (тобто визначення сил які діють на ярмові балки та пресуючі кільця);
- 2) визначення тиску на прокладки  $\sigma_{n,y} = F_{n,y}/S$  та максимального тиску в прокладках  $\sigma_{max} = P_{max}/S$ , де  $S$  – площа опори

(прокладок) обмотки,  $P_{(y)}$  – зусилля стискання в будь-якому перерізі обмотки; порівняння максимального тиску з допустимим;

3) вибір сили осьової запресовки  $P_0$ , та  $\sigma_0$ .

Під час дії електромагнітних сил опори обмотки, запресованою силою  $P_0$ , лишаються нерухомими, тобто висота між опорами обмотки  $h$  (рис.1, а) залишається такою ж, як і до моменту прикладання сили  $f_{(y)}$ .

Відкинемо опори, та замінимо їх еквівалентними силами (реакціями) (рис.1, б);

$$P_e = P'_e + P_0, \quad (1)$$

$$P_n = P'_n + P_0, \quad (2)$$

де  $P_0$  – сила початкової запресовки;

$P'_n$  та  $P'_e$  – сили в опорах, які визвано дією тільки зовнішнім навантаженням  $f_{(y)}$ , тобто електромагнітними силами.

Рівняння рівноваги обмотки має вигляд:

$$\begin{aligned} F'_e - F'_n - F'_c - F'_r - \int_0^h f_{(y)}' dy &= 0, \\ F'_e - F'_n - F'_r &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

звідки

$$F'_c = \int_0^h f_{(y)}' dy. \quad (4)$$

Величину “інтегральної сили” обмотки  $F_0$  можна розрахувати, оскільки відома крива  $f_{(y)}$ . Для визначення двох величин  $F'_n$  та  $F'_e$  одного рівняння (3) недостатньо.

Розглянемо рівняння рівноваги для обмотки від верхньої опори 0 до наступної координати (рис.1, б та в) [3]:

$$F'_n - F'_e = F'_{(y)} - F'_r + \int_0^y f_{(y)}' dy = 0; \quad (5)$$

$$F'_{(y)} = F'_e + F'_{(y)},$$

$$F_{(y)} = \int F_{(y)} dx = 0. \quad (6)$$

В кінцевому варіанті отримали інтегральну електромагнітну силу ділянки (рис.1, е), ця величина може бути обчислена.

Сила в довільному перерізі  $y$ :

$$P_{(y)} = P_0 + P'_{(y)} = P_0 + P'_e + F'_{(y)}. \quad (7)$$

Двох рівнянь (3) та (7) недостатньо, оскільки невідомих три:  $P'_e$ ,  $P'_e$  та  $P'_{(y)}$ . З точки зору механічних розрахунків маємо статично невизначену задачу. Для вирішення якої необхідно додаткове рівняння сумісництва деформацій.

Абсолютна деформація диференціального елемента ізоляції обмотки з товщиною  $dy_{is}$  (рис.2) після прикладання електромагнітних сил визначається [4]:

$$\varepsilon_{(y)} dy_{is} = \frac{\sigma_{(y)}}{E_{(y)}} dy_{is} = \frac{P'_{(y)}}{E_{(y)} \cdot S_{(y)}} dy_{is}, \quad (8)$$

де  $\varepsilon_{(y)}$  – відносна деформація.

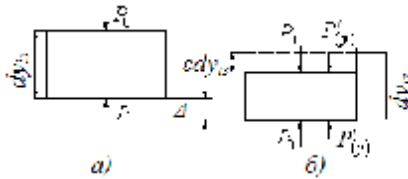


Рис.2. Елемент ізоляції обмотки до прикладення сил (а) та після їх прикладення (б):  $\Delta$  – зміщення елемента від початкового положення після прикладення сил

Повна деформація всіх елементів обмотки повинна дорівнювати нулю з умови незмінності висоти обмотки  $h$

$$0 = \int \varepsilon_{(y)} dy_{is} = \int \frac{P'_{(y)}}{E_{(y)} \cdot S_{(y)}} dy_{is}. \quad (9)$$

Інтегрування проводиться тільки для ділянок ізоляції (міде не деформується), тому замість  $dy$  використовуємо величину  $dy_{is}$ . Вираз (9) дає змогу визначити опорну силу  $P'_e$ . Наприклад

при  $S_{(y)} = S = const$  та  $E_{(y)} = E = const$  маємо (з урахуванням (5),

$$(6) \text{ та } k_{\omega} = \int_0^h \delta^2 y_{\omega}$$

$$\frac{E_0}{ES} \int_0^h \delta^2 y_{\omega} - \frac{1}{ES} \int_0^h k_{(y)} \delta^2 y_{\omega} = 0; \quad (10)$$

$$F_P = - \frac{1}{k_{\omega}} \int_0^h F_{(y)} \delta^2 y_{\omega} = - \frac{1}{k_{\omega}} \int_0^h \delta^2 y_{\omega} \int_0^h k_{(y)} \delta^2 y = 0. \quad (11)$$

Таким чином, для знаходження сили  $F'_s$  необхідно подвійне інтегрування кривої  $f_{(y)}$ .

Рівняння (11), (5), (7), (1) та (2) в загальному виді дають можливість вирішення задачі знаходження зусиль в обмотці та опорних зусиль.

Розглянемо дію однієї зосередженої сили, та виконаємо розрахунки для визначення зусилля вздовж перерізу у наступній послідовності.

На (рис.3, а) показано обмотку з одиничною зосередженою силою  $F$ . Крива  $f_{(y)}$ , необхідна для визначення сили  $P_s$  по (11), має простий вид ступінчастої лінії, де величина ступіні дорівнює  $F = F_0$  (рис.3, б та в).

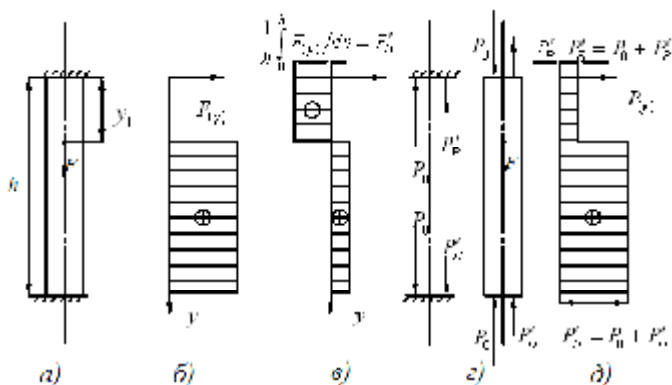


Рис.3. До розрахунку осьових зусиль в обмотках з однією зосередженою силою  $F$ : а – обмотка та діючі сили, б – крива  $f_{(y)}$ , в – допоміжна крива  $f'_{(y)}$ , г – сили на опорах та торцях обмотки, д – результуюча крива діючих в обмотці зусиль

У відповідності з розрахунком по (11) отримаємо:

$$F'_s = -F \frac{h - y_1}{h};$$

для перерізу  $0 < y < y_1$

$$F(y) = F_s - F'_s - F'_c - F \frac{h - y_1}{h}; \quad (12)$$

для перерізу  $y_1 < y < h$

$$F(y) = F_s - F'_s + F \frac{y_1}{h}. \quad (13)$$

На верхній опорі сила не збільшується, а послаблюється ( $F_1 + F'_s < F'_c$ ).

Величина  $F'_c$  від'ємна, тобто верхня частина обмотки “розтягується”. Останній термін умовний, так як величина тиску в обмотці залишається додатною ( $F_1 + F'_{y_1} > 0$ ) та відбувається лише зменшення сили стискування.

**Висновок.** Отримана методика дозволяє визначити розподілення осьових зусиль по висоті обмотки, що надає можливість отримати зусилля запресовки обмотки для виключення деформацій. Методика основана на розрахунку обмотки як статично невизначеної системи та враховує ряд показників (розподілення електромагнітних сил, деформації електрокартонної та іншої ізоляції).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сергеенко Б. Н. Электрические машины / Б. Сергеенко, Н. Киселе. — М. : Высшая школа, 1989. — 183 с.
2. Беляева Е. И. Как рассчитать ток короткого замыкания. — 2-е. изд. перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 98 с.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. 3-е. изд. — Машиностроение, 1974. — 204 с.
4. Лурье А. И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. — М. : Знак, 2005. — 96 с.