

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СЛОЕВЫМИ ОБМОТКАМИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

И. Д. КУТЯВИН, П. Е. АЗАРЯН

Проблеме прочности обмоток трансформаторов при действии осевых усилий посвящено много работ, целью которых являлось определение осевых электромагнитных сил, результирующего механического напряжения в проводах и изоляции, а также сил, действующих на концевую изоляцию.

При этом ток короткого замыкания (к. з.) считался неизменным во времени, а конфигурация обмоток — допускающей смещение витков и слоев или взаимное смещение обмоток под действием электромагнитных усилий, что приводит к изменению самих усилий [1, 2, 3].

Изменяющееся в процессе к. з. электромагнитное усилие воздействует на обмотку, представляющую собой упругую механическую систему. Для анализа происходящих в обмотке явлений необходимо учесть изменяющиеся во времени коэффициенты упругости различных изоляционных материалов, силы инерции, упругости и трения [5, 6, 7, 8, 9].

До сих пор почти все авторы исследовали механические процессы спирально-катушечных обмоток мощных трансформаторов, где элементарные катушки разделяются дистанционными прокладками, которые вместе с витковой изоляцией представляют упругую пружину (вследствие предварительной запрессовки) с собственной частотой свободных колебаний.

Силы трения здесь не могут играть значительной роли, и некоторые авторы [8, 9] проводили исследования в консервативной системе.

Что касается механических процессов в витках или слоях слоевых обмоток, они почти не рассмотрены в специальной литературе.

Целью статьи является исследование механических процессов в слоях слоевых обмоток в диссипативной системе при неустановившемся режиме к. з. с разработкой инженерной методики расчета и оценки необходимой силы трения между слоями слоевых обмоток, при которой смещение слоев при ударном токе к. з. не превышало бы допустимой деформации концевой изоляции слоя. Для упрощения задачи приняты следующие допущения:

1. Система совершает только продольные колебания. Отсутствуют искажения (изгибы) осей или поперечных сечений,

2. Между подкладками ярмовой изоляции и слоями (после предварительной запрессовки), а также между витками в слое при плотной намотке нет никаких разрывов,

3. Трение между слоями равномерно по длине слоя и пропорционально скорости смещения его.

4. Концевая изоляция имеет пренебрежимо малую массу и рассматривается как идеальная пружина

5. По сравнению с электродинамическими усилиями сила тяжести незначительная.

6. Слой витков, связанных друг с другом пружинами с большими жесткостями, считается абсолютно твердым.

Исследование сводится к известной задаче о вынужденных продольных колебаниях упругого стержня в диссипативной системе.

Уравнение колебаний  $i$ -го слоя в случае короткого замыкания в момент прохождения напряжения через нуль будет

$$\ddot{S}_i = 2l_i \dot{S}_i + k_i^2 S_i = \frac{1}{2} H (1 + 2e^{-\alpha t} - 4e^{-2\alpha t} \cos \omega t + \cos 2\omega t), \quad (1)$$

где

$$H = \frac{F}{nM}, \quad l_i = \frac{\gamma_i}{2M}, \quad k^2 = \frac{\kappa}{M}. \quad (2)$$

Для начала и конца  $i$ -го слоя действительны следующие начальные условия:

$$t = 0; \quad S_i = 0; \quad \dot{S}_i = 0. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (1), получим

$$S_i = X_i + \left[ \frac{H}{2k_i^2} + \frac{Hl^{-2\alpha t}}{\omega^2 + (C_i - 2\alpha)^2} \right] - \frac{2Hl^{-\alpha t} \cos(\omega t - \alpha_i)}{\sqrt{(k_i^2 - 2C_i\alpha + \alpha^2 - \omega^2)^2 - 4\omega^2(C_i - \alpha)^2}} + \frac{H \cos(2\omega t + \delta_i)}{2\sqrt{(h^2 - 4\omega^2)^2 + 16C_i^2\omega^2}}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_i = \operatorname{arctg} \frac{2\omega(\alpha - C_i)}{\omega^{*2} - \omega^2 + (C_i - \alpha)^2}, \quad (5)$$

$$\delta_i = \operatorname{arctg} \frac{2\omega C_i}{4\omega^2 - \kappa^2}, \quad (6)$$

при этом  $X_i = a_i l^{C_i t} \operatorname{sh}(\omega^* t + \beta_i)$ , когда  $C_i < k_i$ ,

$$\omega^* = \sqrt{k_i^2 - C_i^2}, \quad (7)$$

при этом  $X_i = a_i l^{-C_i t} \operatorname{sh}(\omega^* t + \beta_i)$ , когда  $C_i > k_i$ ,

$$\omega^* = \sqrt{C_i^2 - k_i^2}, \quad (8)$$

$$X_i = e^{-C_i t} (C_{i1} + C_{i2}t), \quad \text{когда } C_i = k_i, \quad (9)$$

при этом  $\omega^* = 0$ ,

$a_i, \beta_i, C_{i1}$  и  $C_{i2}$  — постоянные, которые определяются из начальных условий (3).

Как известно, в начале к. з. на слой действует электромагнитное усилие с кажущейся частотой  $\omega$ . При этом перемещение слоя будет

$$S = \frac{2He^{-\alpha t} \cos(\omega t + \gamma_i)}{\sqrt{(k_i^2 + 2\alpha C_i + \alpha^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2(C_i - \alpha)^2}}. \quad (10)$$

Исследования уравнения (4) в динамическом и статическом режимах в диссипативной и консервативной системе по членам показали,

что смещение слоев, выраженное уравнением (10), в 3—4 раза больше, чем в остальных режимах, и сильно зависит от коэффициента затухания  $C_i$ .

В динамическом режиме смещающийся слой резонирует слабо при

$$C_i = \frac{\alpha(k_i^2 + \omega^2 + \alpha^2)}{2(\omega^2 + \alpha^2)} \quad (11)$$

и сильно резонирует в статическом режиме, когда

$$C_i = \frac{k^2 + \alpha^2}{2\alpha}. \quad (12)$$

Следовательно, из интервала

$$\frac{\alpha(k_i^2 + \omega^2 + \alpha^2)}{2(\omega^2 + \alpha^2)} < C_i < \frac{k^2 + \alpha^2}{2\alpha} \quad (13)$$

можно выбрать такое  $C_i$ , при котором амплитуда в момент  $t = 0$  из (10) не превосходила бы требуемой, то есть

$$\frac{2H}{\sqrt{(k_i^2 - 2\alpha C_i + \alpha^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2(C_i - \alpha)^2}} \leq \frac{[\sigma]_{из} h}{E_{из}}, \quad (14)$$

где  $E_{из}$  — коэффициент упругости изоляции, равный для прессованного электрокартона  $3,5 \cdot 10^3 \frac{\kappa \text{гс}}{\text{см}^2}$  при усилии прессовки  $\frac{\kappa \text{гс}}{\text{см}^2}$  (10);  $[\sigma]_{из}$  — напряжение концевой изоляции слоя из электрокартона; принимается  $200 \frac{\kappa \text{гс}}{\text{см}^2}$  [1];  $h$  — высота концевой изоляции.

С другой стороны, сила трения

$$F_{\tau} = 2C_i M \frac{d\delta}{dt}. \quad (15)$$

Дифференцируя уравнение (10) и подставляя в (15), после некоторого преобразования получим

$$F_{\tau} = \frac{8F\omega^2 + \frac{4F\alpha(k_i^2 - \omega^2)}{C_i}}{4\omega^2 n + \frac{n(k_i^2 - \omega^2)^2}{C_i^2}}. \quad (16)$$

Если система консервативная, то есть  $C_i = 0$ , то  $F_{\tau} = 0$ .

При этом собственная частота системы зависит от предварительной запрессовки обмоток, а если система диссипативная, то при увеличении коэффициента затухания  $C_i$   $F_{\tau}$  увеличивается и при  $C_i \rightarrow \infty$   $F_{\tau}$  стремится к постоянной величине

$$\lim_{C_i \rightarrow \infty} F_{\tau} = \frac{2F}{n}.$$

Принимаем

$$F_{\tau} = \frac{2F}{n}. \quad (17)$$

При соблюдении (15)  $C_i$  из выражения (16) принимает конечное значение

$$C_i = \frac{k^2 - \omega^2}{2}. \quad (18)$$

Выражение (18) является той величиной коэффициента затухания, при которой сила трения соответствует значению (17), и находится в интервале (13).

Для обеспечения устойчивости обмоток в этом же режиме при значении  $C_i$  необходимо и достаточно, чтобы смещение слоев при не установившемся режиме к. з. удовлетворяло неравенству (14).

Подставляя значение (18) в (14) и решая неравенство по  $k^2$ , получим

$$k^2 \geq \omega^2 + \frac{E_{из} \alpha F_T}{M [\sigma]_{из} h \sqrt{\omega^2 + \alpha^2}}. \quad (19)$$

Выражение (19) показывает, что, чем больше силы трения между слоями в динамическом режиме, тем больше жесткость обмотки.

Следовательно, в диссипативной системе жесткость обмотки не только зависит от предварительной запрессовки, но и от силы трения между слоями.

В частном случае, когда  $\omega = 0$  и опорная поверхность

$$Q = \frac{F}{n [\nu]_{из}}, \quad \text{то} \quad K = \frac{E_{из} Q}{h}.$$

Мы получили известную формулу механики для определения жесткости пружины в статическом режиме.

Из выражения (19) опорная поверхность  $Q'$  при динамическом режиме будет

$$Q' \geq \frac{4\omega^2 h M}{E_{из}} + \frac{4\alpha F_T}{[\nu]_{из} \omega}. \quad (20)$$

Для трансформаторов I и II габаритов при  $M$  в  $\frac{кгс}{м}$ , и  $h$  в метрах выражение (20) принимает следующий вид:

$$Q' \geq (1,6M + 64\alpha F_T 10^{-6}) \text{ см}^2. \quad (21)$$

При этом циклическая частота свободных колебаний слоя в диссипативной системе будет

$$\omega = \sqrt{C_i^2 - h^2}, \quad (22)$$

где  $C_i$  и  $k^2$  из (18) и (19).

Выражение (22) показывает, что движение слоя в этом случае не имеет колебательного характера. При этом свободные колебания системы оказываются совершенно уничтоженными, а смещение слоев в не установившемся режиме к. з. не превосходит допустимой деформации концевой изоляции.

Суть методики расчета электродинамической устойчивости трансформаторов со слоевыми обмотками заключается в следующем. При заданных параметрах трансформатора рассчитывается [1]

$$F = 7,65 a_0 D_{ср} \left( \frac{Y W_{кз}}{h} \right) k^2 k_{уд}^2 \text{ кгс}.$$

После этого определяется  $F_T$  по формуле (17);  $\sigma \nu_p$  — по кривой (10) и необходимая опорная поверхность  $Q$  по формуле (20).

Если

$$\sigma_{пр} \leq [\nu]_{пр} \quad Q' \leq [Q],$$

то трансформатор электродинамически устойчив. Здесь  $[Q]$  — возможная опорная поверхность обмоток, полученная при проектировании

трансформаторов;  $[\gamma]_{\text{пр}} = 3,5 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$  для провода марки АПББО, а для марки АПБ  $[\sigma]_{\text{пр}} = 4,2 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ .

В качестве иллюстрации приведем пример.

Трансформатор 630/6 = 0,4, со следующими параметрами:  $F = 6000 \text{ кгс}$ , количество слоев ВН  $n = 6$ , масса слоя  $M = 0,62 \frac{\text{кгс сек}^2}{\text{м}}$ ,  
 $\alpha = 25 \frac{1}{\text{сек}}$ .

Для обеспечения электродинамической устойчивости обмоток трансформаторов необходимо создать между слоями силу трения:

$$F_{\text{т}} = \frac{2 \cdot 6000}{6} = 2000 \text{ кгс}.$$

При этом необходимый натяг для обмоточного провода АПББО будет  $\sigma_{\text{пр}} = 3,0 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$ . Опорная поверхность

$$Q' \geq 1,6 \cdot 0,62 + 64 \cdot 25 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 4,2 \text{ см}^2.$$

При этом предварительное усилие запрессовки должно быть  $50 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ .

### Выводы

1. Формулы (19) и (20) являются обобщенными и теоретически обоснованными, что дает возможность определить жесткость и необходимую опорную поверхность для обеспечения устойчивости трансформаторов со слоевыми обмотками при статическом и динамическом режиме короткого замыкания.

2. Предложенная методика, как метод проектирования электродинамически устойчивых трансформаторов, является обобщенной и теоретически обоснованной. Она не противопоставляется существующим, а дополняет их.

### Математические обозначения

$S_i$  — смещение  $i$ -го слоя;

$C_i$  — коэффициент затухания;

$k$  — частота свободного колебания при консервативной системе;

$H$  — ускорение при движении слоя,  $\alpha = \frac{R}{L}$ ;

$R$  — сопротивление обмотки;

$L$  — индуктивности трансформатора;

$\omega$  — частота возмущающего усилия;

$n$  — количество слоев в обмотке;

$M$  — масса слоя;

$\omega^*$  — частота свободного колебания слоя в диссипативной системе;

$h$  — высота концевой изоляции;

$[\sigma]_{\text{пр}}$  — допустимое напряжение при растяжении проводниковых материалов;

$[\sigma]_{из}$  — допустимое напряжение смятия изоляционных материалов;  
 $E_{из}$  — коэффициент упругости изоляционных материалов;  
 $Q, Q'$  — опорные поверхности обмоток.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Лурье, Е. И. Левицкая. Электродинамическая прочность трансформаторов I—II габаритов со слоевыми обмотками. «Электротехника», № 4, 1967.
2. П. М. Тихомиров. Расчет трансформаторов. «Энергия». М., 1968.
3. Н. И. Булгаков. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, М., 1950.
4. П. Е. Азарян, Ю. А. Оганесян. Магнитосимметричные схемы слоевых обмоток трансформаторов. «Промышленность Армении». № 4, 1967.
5. М. С. Либкинд. Механические силы в обмотках трансформаторов. «Электричество», № 9, 12, 1945.
6. И. С. Наяшков, С. И. Лурье. Экспериментальные исследования механической прочности трансформаторов при коротком замыкании. «Вестник электропромышленности», № 2, 1962.
7. Г. Н. Петров, И. С. Наяшков. Электродинамические силы в трансформаторах. «Электричество», № 9, 1955.
8. T. Tournier, Ct. Ebersahl, A. Ciniero, S. Vakov, A. D. Madin, T. D. Whitaker. A Study of the dynamic behavior of transformer windings under short-circuit conditions. CIGRE 1962, № 143, 143a.
9. E. Pirkki, G. M. Spallanzani. Recent advancements in the field of Short-circuit forces in transformer coils. CIGRE, 1962, № 122.
10. С. И. Лурье, Л. И. Мильман. Механические характеристики изоляционных материалов обмоток трансформаторов. «Электротехника», № 4, 1964.