

О СНИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ (ЭДУ) В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Г. В. ДЕЛЬ, В. П. КРАСНОВ, И. Д. КУТЯВИН

Токи короткого замыкания, протекая по обмоткам трансформаторов, вызывают электродинамические усилия между ними. Эти усилия растут с увеличением мощности трансформатора, достигая опасных величин. В практике эксплуатации многочисленны случаи повреждения обмоток при коротких замыканиях за трансформаторами, в связи с этим представляет интерес снижение ЭДУ в их обмотках. Это особенно относится к современным сверхмощным трансформаторам.

Для выяснения способов снижения ЭДУ можно воспользоваться выражением для механического напряжения в материале обмоток от радиальной составляющей ЭДУ

$$\sigma = k \frac{\Delta^2 q_m l_m}{h x_p^2} \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

где

$$k = 6,37 k_r \cdot 10^{-8},$$

Δ — плотность тока в обмотке, а/см^2 ,

q_m — полное сечение материала обмотки фазы, см^2 ,

l_m — длина среднего витка обмотки, см ,

h — полная осевая высота обмотки, см ,

x_p — наименьшее расчетное сопротивление цепи при коротком замыкании за трансформатором (в относительных единицах),

k_r — коэффициент Роговского.

Как видно из (1), снижения механического напряжения в материале обмоток можно достичь изменением ряда величин. Однако, не ухудшая экономичности и конструктивности трансформатора, можно использовать для этой цели только величины q_m и x_p , входящие в (1) в виде отношения

$$v = \frac{q_m}{x_p^2}. \quad (2)$$

Одним из способов снижения ЭДУ является расщепление обмоток трансформаторов. При этом, части расщепленной обмотки могут быть соединены между собою внутри кожуха трансформатора или

могут иметь самостоятельные выводы на крышку кожуха для раздельной работы.

В первом случае одна из обмоток фазы двухобмоточного трансформатора расщепляется на две части, охватывающие вторую обмотку этой фазы, как это показано на рис. 1. Обмотка II в этом случае испытывает ЭДУ отталкивания от обеих частей обмотки I. Внутренняя часть обмотки I подвергается сжатию, а наружная — растяжению.

Наибольшее напряжение в материале при коротком замыкании за трансформатором испытывает наружная половина обмотки I. Величина этого напряжения определяется из (1) при подстановке в числитель $0,5 q_m$, а в знаменатель $-x_p = u_k$ (u_k — напряжение короткого замыкания трансформатора в относительных единицах), и будет в два раза меньше, чем для трансформатора с неразделенной обмоткой. Отношение (2) в этом случае будет равно

$$v = 0,5 \frac{q_m}{u_k^2} \quad (3)$$

В последнее время находит все более широкое применение расщепление обмоток мощных трансформаторов с целью использования их для раздельной работы. Это ограничивает токи короткого замыкания во вторичных обмотках и снижает в них ЭДУ.

Расщепление обмоток применяется и в блочных трансформаторах для раздельного соединения ветвей обмотки статора генератора с частями расщепленной первичной обмотки (рис. 2а) или для укрупненного блока (рис. 2б).

Сделанные выводы справедливы и для блоков с однофазными трансформаторами. Мощные однофазные трансформаторы изготавливаются на двухстержневых сердечниках с дополнительными боковыми ярами. Каждая из обмоток выполняется в виде двух парал-

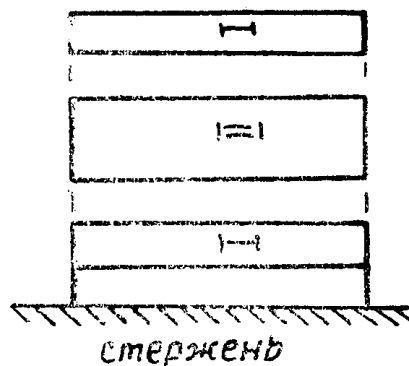


Рис. 1.

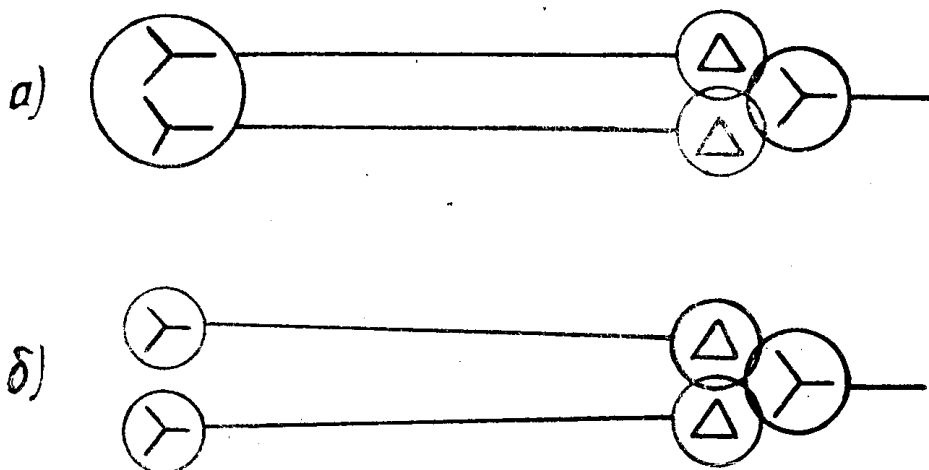


Рис. 2.

лельных ветвей, сидящих на разных стержнях и имеющих слабую взаимоиндукцию при коротких замыканиях. Следовательно, однофазные двухстержневые трансформаторы имеют естественное расщепление обмоток. Значение x_p определяется отдельно для обмоток каждого стержня. Это дает снижение ЭДУ, с учетом (3), в два раза. Однако возможно расщепление обмоток каждого стержня в соответствии с рис. 1. Тогда электродинамические усилия будут снижены в четыре раза.

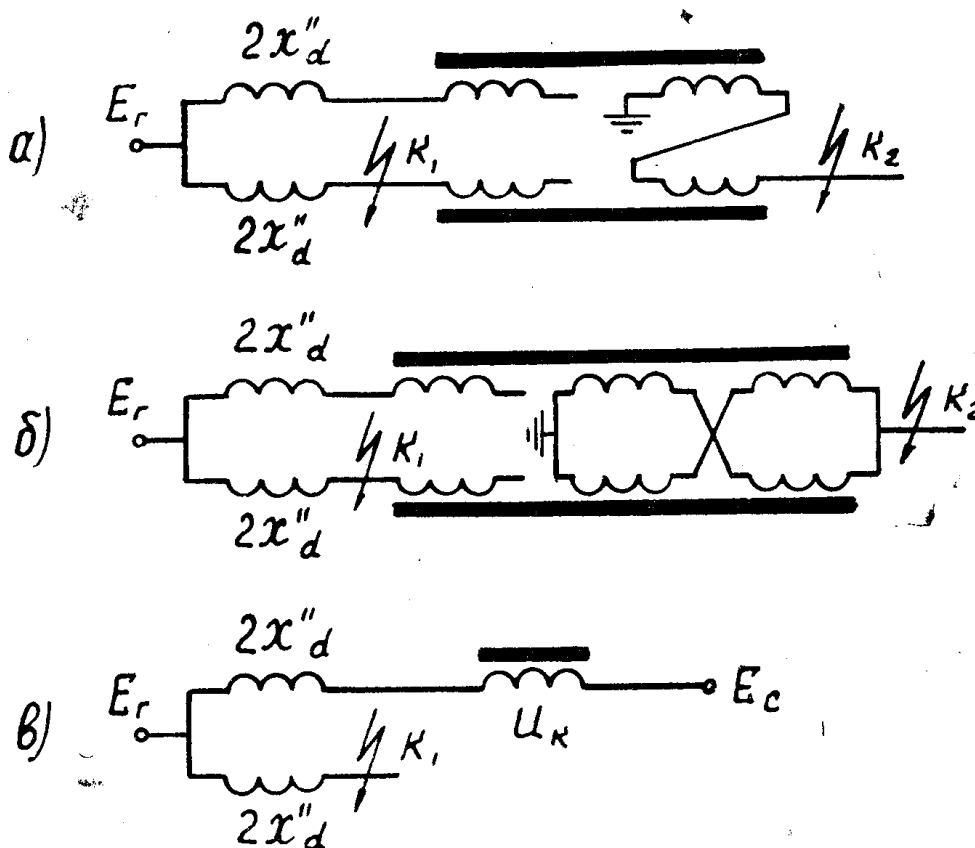


Рис. 3.

Но для однофазных трансформаторов возможен еще один интересный вариант соединения обмоток, приведенный на рис. 3а. Вторичная обмотка трансформатора, состоящая из двух секций, размещенных на разных стержнях, соединяется последовательно. Для лучшего использования площади окна эта обмотка может выполняться из четырех секций, соединенных по схеме (рис. 3б). Ток со стороны системы I_c при коротком замыкании в точке K_1 можно определить из уравнения (рис. 3в)

$$E_c = E_r + I_c (2x''_d + u_k), \quad (4)$$

где

E_c и E_r — э. д. с. системы и генератора,

x''_d и u_k — сопротивления в омах в (4) — (6) выражениях.

Поскольку обмотка одного стержня накоротко замкнута, то вся э. д. с. системы приложена к обмотке второго стержня, поэтому в (4) необходимо положить $E_c = 2E_r$. Тогда ток со стороны системы

$$I_c = \frac{E_r}{2x''_d + u_k} \quad (5)$$

При коротком замыкании в точке κ_2 ток, протекающий через трансформатор со стороны генератора блока,

$$I_0 = \frac{E_r}{x''_d + u_k} \quad (6)$$

Следовательно, $x_{p1} = 2x''_d + u_k$ и $x_{p2} = x''_d + u_k$.

Расчетным является x_{p2} . При $x''_d = u_k$; $x_{p2} = 2u_k$. Тогда отношение (2) будет иметь следующее выражение:

$$v = \frac{0,5q_m}{x^2_{p2}} \leq \frac{q_m}{8u^2_k} \quad (7)$$

В этом случае напряжение в материале σ_p будет снижено по сравнению с трехфазным трансформатором в восемь раз и по сравнению с двухстержневым однофазным — в четыре раза.

Поскольку сопротивления рассеяния обмоток (рис. 3) стержней соединяются последовательно, расчетное напряжение короткого замыкания стержня, приведенное к его мощности, $u_{kc} = 0,25 u_k$.

В последнем случае при коротком замыкании в точке κ_1 к току системы добавится ударный ток намагничивания стержня с неповрежденной обмоткой, так как намагничивание этого стержня увеличится за счет приложения к его обмотке высшего напряжения, почти двойного напряжения ($E_c \cong 2E_r$). В результате суммарный ток со стороны системы может оказаться расчетным для определения ЭДУ. Чтобы выяснить данный вопрос, найдем этот ток, воспользовавшись схемой замещения (рис. 4). Найдем в начале выражение для сопротивления ветви намагничивания x_0 схемы замещения. За пределами номинальной индукции B_H кривую намагничивания можно спрямить

$$B = B_H + mI_0, \quad (8)$$

где

$B_H = 17$ кгс — номинальная расчетная индукция,

m — угловой коэффициент,

I_0 — намагничивающий ток трансформатора.

Для определения величины m возьмем на кривой намагничивания холодно катаной стали Э330 две точки с координатами: ($B_H = 17$ кгс, $H_{17} = 10$ а/см) и ($B = 20$ кгс, $H_{20} = 300$ а/см). Тогда значение m определится из выражения:

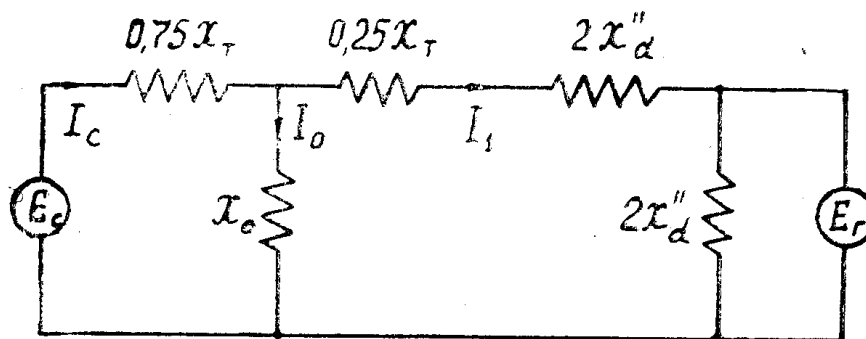


Рис. 4.

$$m = \frac{W(B - E_H)}{l_c (H_{20} - H_{17})} = 10,3 \frac{W}{l_c}, \quad (9)$$

где

W — число витков обмотки низшего напряжения,
 l_c — длина средней силовой линии.

Э. д. с. обмотки низшего напряжения трансформатора при $t = 0$

$$E_T = kB = k(B_H + mI_0) = U_H + kmI_0. \quad (10)$$

Сопротивление ветви намагничивания

$$x_0 = \frac{E_T}{I_0} = \frac{U_H}{I_0} + a, \quad (11)$$

$$\text{где } a = km = 10,3 \frac{W}{l_c} \cdot \frac{U_H}{B_H}.$$

Воспользуемся следующими уравнениями для схемы (рис. 4)

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_1 + I_0; E_c = 0,75x_T I_c + x_0 I_0; \\ E_c &= E_T = 0,75x_T I_c + I_1(0,25x_T + 2x''_d) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

При этом

$$E_c = 2E_T \text{ и } E_T \cong U_H.$$

Совместное решение уравнений (12) дает

$$I_0 = \frac{U_H - 0,75x_T I_1}{a + 0,75x_T}; \quad I_1 = \frac{U_H z}{(x_T + 2x''_d)(z + 1) - 0,75x_T}. \quad (13)$$

Суммарный ток со стороны системы при коротком замыкании в точке K_1

$$I_c = \frac{U_H [az + (x_T + 2x''_d)(z + 1) - 0,75x_T]}{(a + 0,75x_T)[(x_T + 2x''_d)(z + 1) - 0,75x_T]} = \frac{U_H}{x_{p1}}, \quad (14)$$

$$\text{где } z = \frac{a}{0,75x_T}; \quad x_T = \frac{U_K \% U_{\Phi}^2}{100S_{\Phi}}; \quad x''_d = \frac{x''_d \% U_H^2}{100S_{нг}};$$

$$x_{p1} = \frac{(a + 0,75x_T)[(x_T + 2x''_d)(z + 1) - 0,75x_T]}{az + (x_T + 2x''_d)(z + 1) - 0,75x_T}. \quad (15)$$

Здесь все сопротивления в омах .

S_{Φ} — номинальная мощность однофазного трансформатора,

$S_{нг}$ — номинальная мощность генератора,

U_H — номинальное напряжение генератора.

Исследования показывают, что сопротивление x_{p1} , найденное из (15), с ростом мощности блока (рис. 3) уменьшается, достигая для блока с однофазными трансформаторами 400 Мва $x_p = 2,4x_T$ и для блока с однофазными трансформаторами 600 Мва $x_{p1} = 2,16x_T$. Следовательно, с учетом ударного намагничивающего тока сопротивление x_{p1} для однофазных трансформаторов мощностью до 400 Мва (в фазе) будет больше x_{p2} . Поэтому для определения ЭДУ расчетным будет x_{p2} . И только для однофазных трансформаторов большой мощности за расчетное сопротивление следует принимать x_{p1} , определяемое из (15).

Таким образом, ЭДУ мощных однофазных блочных трансформаторов не только могут быть снижены до допустимых значений, но и может быть создан значительный запас прочности их обмоток. Это особенно важно для трансформаторов большой мощности со слоевыми обмотками, имеющими меньшую электродинамическую устойчивость.