

## ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЗАПРЕССОВКЕ, ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В СЛУЧАЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЛОЧНОЙ СБОРКИ

*Розглянуто трансформатори стержневого типу, в яких усі обмотки одного стержня розташовані між загальними верхнім і нижнім пресувальними елементами (плитами, кільцями), стягнутими за допомогою вертикальних шпильок. Визначено зусилля, що виникають у різновисоких обмотках під час пресування. Отримано вирази для визначення зусиль в обмотках при змінюванні їх температури та вмісту вологи ізоляційних матеріалів. На числових прикладах вивчено вплив на ці зусилля змінювання температури обмоток та вмісту вологи в ізоляційних матеріалах.*

**1. Введение.** Определение сил осевой прессовки обмоток является одной из ключевых задач при проектировании мощных силовых трансформаторов. Обусловлено это тем, что во многих случаях они имеют решающее значение для обеспечения электродинамической стойкости обмоток. Разработке методов расчета сил осевой прессовки, необходимых для получения заданных значений критических напряжений радиальной устойчивости обмоток, посвящены работы [3–5]. Силы осевой прессовки, при которых отсутствует кручение винтовых обмоток, найдены в работе [1], однако влияние многих факторов на них не изучено. В связи с широким внедрением запрессовки обмоток с помощью общих прессующих колец возросла необходимость проведения исследований в этом направлении. В этом случае на значения сил осевой прессовки существенно влияет их распределение между обмотками, расположенными под одним прессующим кольцом. А распределение сил осевой прессовки между обмотками может существенно зависеть от их разновысокости. Кроме того, обмотки, запрессованные общим прессующим кольцом, практически всегда имеют различное осевое строение (различные по высоте наборы проводниковых и изоляционных материалов). Это приводит к различным осевым деформациям обмоток при изменении их температуры или влагосодержания изоляционных материалов, что влечет за собой изменение (перераспределение) сил осевой прессовки. Результаты изучения влияния температуры нагрева и влагосодержания изоляционных материалов на усилия сжатия в специальных лабораторных образцах отражены в работе [8]. Отмечено существенное увеличение осевых усилий сжатия в образцах при увеличении их влагосодержания и температуры нагрева. Такие результаты можно спрогнозировать заранее, если учесть результаты предыдущих исследований [6]. Однако все проведенные ранее исследования не дают ответа на вопрос – как определять усилия в реальных обмотках при их запрессовке общим прессующим кольцом с учетом разновысокости, изменения температуры и влагосодержания, податливости прессующей конструкции. Решению задач, связанных с получением ответа на этот вопрос, посвящена данная статья, продиктованная также необходимостью дальнейшего совершенствования методики, положенной в основу программы ELDINST [7]. Рассматривается конструкция трансформатора, в которой применена так называемая блочная сборка обмоток. Все обмотки одного стержня магнитной системы располагаются между общими верхним и нижним прессующими элементами (например, плитами из древесно-слоистого пластика), стянутыми с помощью вертикальных шпилек. Представленный процесс называется блочной сборкой, потому что собранные таким образом обмотки образуют блок. Шпильки служат для обеспечения запрессовки обмоток. Элементы, между которыми расположены обмотки, играют роль общих прессующих колец, поэтому в дальнейшем их так и будем называть. Блок обмоток насаживается на стержень магнитной системы и закрепляется с помощью специальных элементов. Представленная конструкция обладает рядом преимуществ. Во-первых, в ней не возникают силы трения, приводящие к распрессовке обмоток при подъеме активной части или коротких замыканиях (КЗ) [4]. Во-

вторых, она позволяет обеспечить полную симметрию относительно середин обмоток по высоте, что является оптимальным как по электромагнитным, так и механическим процессам, возникающим при КЗ. Поэтому блочная сборка обмоток находит все более широкое применение.

**2. Определение усилий в разновысоких обмотках при запрессовке общим прессующим кольцом.** Рассмотрим случай, когда действующая на прессующее кольцо сила

прессовки  $Pr$  задана. Она обычно принимается равной сумме заданных сил прессовки отдельных обмоток, расположенных под прессующим кольцом:

$$Pr = \sum_{i=1}^N Pr_i, \quad (1)$$

где  $i$  – номер обмотки ( $i=1, 2, \dots, i, \dots, N$ );  $N$  – количество обмоток под прессующим кольцом.

Требуется определить, какие усилия возникнут в обмотках после запрессовки. Для решения этой задачи используем расчетную схему, изображенную на рис. 1, где  $K$  – прессующее кольцо (в положении после запрессовки обмоток);  $1, 2, \dots, i, \dots, N$  – обмотки (номера обмоток), которые будем рассматривать как линейно-упругие стержни.

Рассмотрим равновесие прессующего кольца, заменив воздействия на него со стороны обмоток возникшими в них после запрессовки внутренними усилиями  $N_{0i}$ , которые имеют положительные значения при сжатии (рис. 1 б). Фактически на прессующее кольцо действуют системы сил, равнодействующие которых  $Pr$ ,

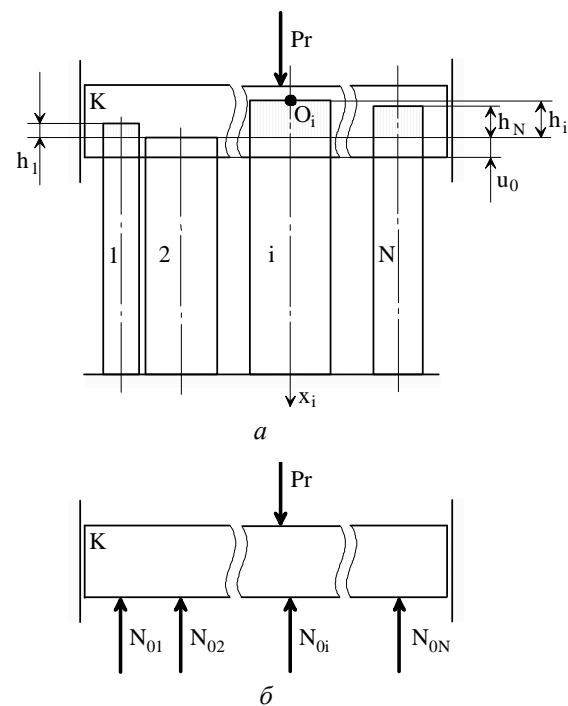


Рис. 1

$N_{0i}$  расположены на общей оси обмоток. В этом случае можно записать только одно условие равновесия прессующего кольца в проекции на вертикальную ось, которое выглядит следующим образом:

$$Pr - \sum_{i=1}^N N_{0i} = 0. \quad (2)$$

Имеется одно уравнение статики (2), в которое входит  $N$  неизвестных усилий  $N_{0i}$ . Следовательно, задача  $N-1$  раз статически неопределимая. Для раскрытия статической неопределимости рассмотрим деформации обмоток с учетом их разновысокости. Выберем самую низкую обмотку и определим по отношению к ней приращения высот остальных обмоток –  $h_i$  (рис. 1 а). Тогда абсолютная деформация каждой обмотки  $u_i$ , возникающая при запрессовке, будет равна сумме ее превышения над самой низкой обмоткой –  $h_i$  и абсолютной деформации самой низкой обмотки –  $u_0$ :

$$u_i = h_i + u_0. \quad (3)$$

Усилие, возникшее в обмотке при запрессовке, в рассматриваемом случае определяется выражением

$$N_{0i} = c_i u_i, \quad (4)$$

где  $c_i$  – коэффициент жесткости  $i$ -й обмотки при сжатии в осевом направлении, соответствующий полной деформации (секущий).

С учетом формулы (3) выражение (4) окончательно примет такой вид:

$$N_{0i} = c_i (h_i + u_0). \quad (5)$$

Введение в рассмотрение деформаций позволило усилия, возникающие во всех обмотках при запрессовке, выразить через одну неизвестную величину – абсолютную деформацию самой низкой обмотки  $u_0$ . Эту неизвестную найдем из уравнения (2) после подстановки в него выражений для усилий (5). В результате имеем

$$u_0 = \left( \text{Pr} - \sum_{i=1}^N c_i h_i \right) c_W^{-1}, \quad (6)$$

где

$$c_W = \sum_{i=1}^N c_i. \quad (7)$$

Используя формулы (5), (6), получаем выражение для определения усилий, возникших в обмотках при запрессовке:

$$N_{0i} = c_i \left[ \left( \text{Pr} - \sum_{i=1}^N c_i h_i \right) c_W^{-1} + h_i \right]. \quad (8)$$

Из выражений (6), (8) следует, что все обмотки, расположенные под одним прессующим кольцом, будут запрессованы (будут иметь положительные значения усилий  $N_{0i}$ ), если выполняется условие

$$\text{Pr} > \sum_{i=1}^N c_i h_i. \quad (9)$$

В противном случае некоторые обмотки, начиная с самой низкой, будут не запрессованы.

Полученные результаты также показывают, что в общем случае усилия, возникшие в обмотках после запрессовки, не равны заданным силам прессовки  $N_{0i} \neq \text{Pr}_i$ . При этом указанные усилия могут быть меньше заданных сил прессовки ( $N_{0i} < \text{Pr}_i$ ), а это недопустимо. Поэтому найдем силу прессовки  $\text{Pr}_{\max}$ , при действии которой на прессующее кольцо возникшие в обмотках усилия будут не меньше заданных сил прессовки ( $N_{0i} \geq \text{Pr}_i$ ).

Сформулированная задача решается в такой последовательности. Вначале для каждой обмотки рассчитывается абсолютная деформация, при которой в ней возникнет усилие, равное заданной силе прессовки. Выполняется это с помощью выражения

$$u_{pi} = \frac{\text{Pr}_i}{c_i}. \quad (10)$$

Далее определяются соответствующие деформации самой низкой обмотки по формуле

$$u_{0i} = u_{pi} - h_i. \quad (11)$$

В качестве деформации самой низкой обмотки окончательно принимается максимальная из рассчитанных по формуле (11):

$$u_{0\max} = \max\{u_{0i}\}. \quad (12)$$

Усилие в каждой обмотке после запрессовки рассчитывается с помощью выражения

$$N_{\max i} = c_i (u_{0\max} + h_i). \quad (13)$$

Сила прессовки, при действии которой на прессующее кольцо возникшие в обмотках усилия будут не меньше заданных сил прессовки, вычисляется по формуле

$$\text{Pr}_{\max} = \sum_{i=1}^N N_{\max i}. \quad (14)$$

Совершенно очевидно, что после запрессовки в обмотке, которой соответствует максимальная деформация самой низкой обмотки ( $u_{0i} = u_{0\max}$ ), возникшее усилие будет равно заданной силе прессовки ( $N_{\max i} = \text{Pr}_i$ ). В остальных обмотках эти усилия будут превышать заданные силы прессовки ( $N_{\max i} \geq \text{Pr}_i$ ). То есть эти обмотки будут перепрессованы, что не-

желательно, так как ведет к вложению лишних материалов в прессующую конструкцию. Перепрессовки обмоток не будет, если превышения их высот по отношению к самой низкой обмотке будут равны:

$$h_i = u_{pi} - u_0. \quad (15)$$

В этом легко убедиться, подставляя выражение (15) в соотношение (8) и принимая во внимание формулы (1) и (10). При этом усилии, возникшее в каждой обмотке после запрессовки, будет равно заданной силе прессовки ( $N_{\max i} = Pr_i$ ). Чтобы превышения высот обмоток были положительными, в качестве самой низкой следует принять обмотку, имеющую минимальное значение абсолютной деформации  $u_{pi}$ . Силу прессовки, действующую на прессующее кольцо, по-прежнему следует рассчитывать по формуле (1).

**3. Определение усилий в собранных блочно обмотках при изменении их температуры и влагосодержания изоляционных материалов.** Для решения этой задачи используем расчетную схему, изображенную на рис. 2, где  $M$  – магнитная система;  $c_1, c_2$  – пружины, моделирующие верхний и нижний элементы крепления блока обмоток;  $K_1, K_2$  – верхнее и нижнее прессующие кольца;  $s_1, s_2$  – шпильки, стягивающие верхнее и нижнее прессующие кольца. Остальные обозначения имеют тот же смысл, что и на рис. 1. Поставленную задачу будем решать, используя метод, примененный в предыдущем параграфе. Запишем условия равновесия верхнего (рис. 3 а) и нижнего (рис. 3 б) прессующих колец в проекции на вертикальную ось:

$$P_1 + P_s - \sum_{i=1}^N N_i = 0; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N N_i - P_2 - P_s = 0, \quad (17)$$

где  $P_i$  – усилия в верхнем ( $i=1$ ) и нижнем ( $i=2$ ) элементах крепления блока обмоток;  $P_s$  – суммарное усилие в шпильках, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца;  $N_i$  – усилие в  $i$ -й обмотке (положительное при сжатии).

Усилия в верхнем и нижнем элементах крепления блока обмоток, а также суммарное усилие в шпильках, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца, определяются выражениями

$$P_1 = -c_{K1}(u_{K1} + u_M); \quad (18)$$

$$P_2 = c_{K2}u_{K2}; \quad (19)$$

$$P_s = Pr - c_s[(u_{K1} + u_M) - k_s t_s], \quad (20)$$

где  $c_{Ki}$  – коэффициенты жесткости верхнего ( $i=1$ ) и нижнего ( $i=2$ ) элементов крепления блока обмоток;  $u_{Ki}$  – перемещения верхнего ( $i=1$ ) и нижнего ( $i=2$ ) прессующих колец, вызванные изменениями температуры элементов активной части трансформатора или влагосодержания изоляционных материалов;  $u_M$  – перемещение верхнего яра магнитной системы, вызванное изменениями температуры элементов активной части трансформатора;  $c_s$  – суммарный коэффициент жесткости шпилек, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца;  $k_s$  – коэффициент линейного расширения шпилек, стягивающих верхнее и нижнее прес-

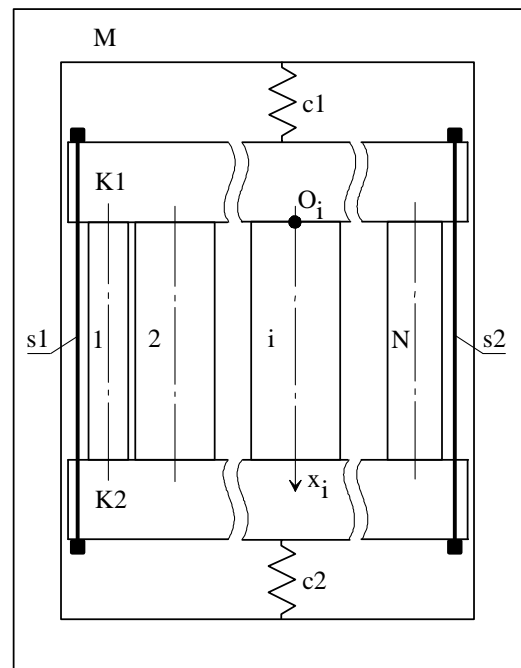


Рис. 2

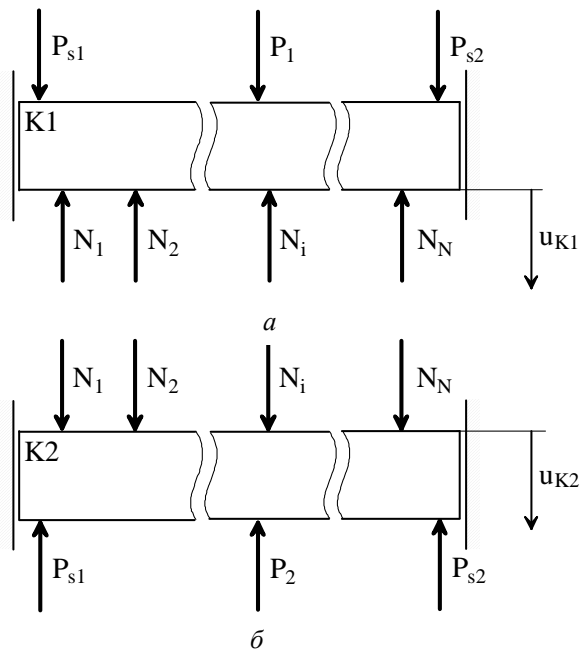


Рис. 3

ствующие кольца;  $t_s$  – изменение средней температуры шпилек, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца.

Усилие в  $i$ -й обмотке при изменении ее температуры и влагосодержания изоляционных материалов определяется следующим образом:

$$N_i = N_{0i} - c_i[(u_{K2} - u_{K1}) - kt_i \cdot t_i - kw_i \cdot w_i], \quad (21)$$

где  $kt_i$ ,  $kw_i$  – коэффициенты линейного расширения обмотки при изменении ее температуры и влагосодержания изоляционных материалов;  $t_i$ ,  $w_i$  – изменения средней температуры обмотки и среднего влагосодержания ее изоляционных материалов.

В первом приближении магнитную систему будем считать абсолютно жесткой. Тогда перемещение верхнего яра можно представить следующим образом:

$$u_M = k_M t_M, \quad (22)$$

где  $k_M$  – коэффициент теплового линейного расширения магнитной системы;  $t_M$  – изменение средней температуры магнитной системы.

Подставим выражения (18)...(21) в уравнения равновесия прессующих колец (16), (17). Из полученных соотношений найдем перемещения верхнего и нижнего прессующих колец:

$$u_{K1} = -[D_B c_{K1}^{-1} + (1 + c_B c_{K2}^{-1}) k_M t_M] \cdot c c_B^{-1}; \quad (23)$$

$$u_{K2} = [D_B - c_B k_M t_M] \cdot c c_B^{-1} c_{K2}^{-1}, \quad (24)$$

где приняты следующие обозначения:

$$c = \frac{c_B \cdot c_K}{c_B + c_K}; \quad c_B = c_W + c_s; \quad c_K = \frac{c_{K1} \cdot c_{K2}}{c_{K1} + c_{K2}}; \quad D_B = c_s k_s t_s + \sum_{i=1}^N c_i (kt_i \cdot t_i + kw_i \cdot w_i). \quad (25)$$

После подстановки выражений для перемещений прессующих колец (23), (24) в формулу (21) окончательно получим

$$N_i = N_{0i} - c_i [(D_B + c_K k_M t_M) (c_B + c_K)^{-1} - kt_i \cdot t_i - kw_i \cdot w_i]. \quad (26)$$

Аналогично найдем формулы для определения усилий в верхнем и нижнем элементах крепления блока обмоток, а также суммарного усилия в шпильках, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца:

$$P_1 = P_2 = (D_B c_B^{-1} - k_M t_M) \cdot c; \quad (27)$$

$$P_s = Pr + c_s [(D_B c_B^{-1} - k_M t_M) \cdot c c_{K1}^{-1} + k_s t_s]. \quad (28)$$

Если магнитную систему не считать абсолютно жесткой, следует учитывать усилия, возникающие в стержнях магнитной системы. Усилие в магнитной системе, приходящееся на один стержень с обмотками, определяется выражением

$$N_M = Pr + c_M (u_M - k_M t_M), \quad (29)$$

где  $c_M$  – коэффициент жесткости магнитной системы, приходящийся на один стержень с обмотками.

Для определения перемещения  $u_M$  примем во внимание условие равновесия верхней части магнитной системы с обмотками (рис. 4):

$$N_M + P_s - \sum_{i=1}^N N_i = 0. \quad (30)$$

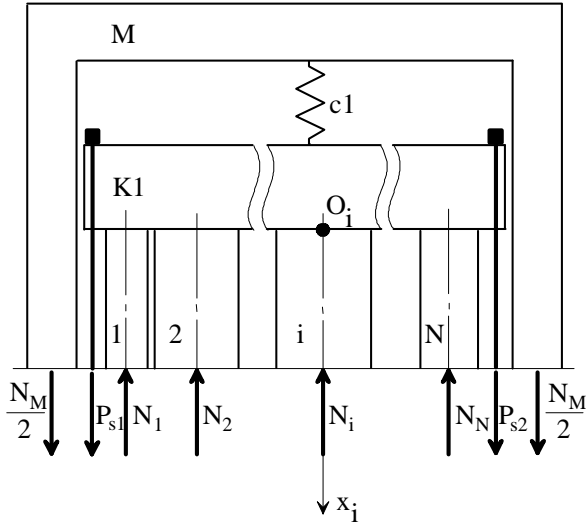


Рис. 4

Выразив в условиях равновесия (16), (17), (30) усилия через перемещения (18)...(21), (29), получим систему трех уравнений с тремя неизвестными, решив которую, получим следующее:

$$u_{K1} = -[D_B(c_{K1}^{-1} + c_M^{-1}) + (1 + c_B c_{K2}^{-1})k_M t_M] \cdot c_F c_B^{-1}; \quad (31)$$

$$u_{K2} = [D_B - c_B k_M t_M] \cdot c_F c_B^{-1} c_{K2}^{-1}; \quad (32)$$

$$u_M = D_B \cdot c_F c_B^{-1} c_M^{-1} + (1 - c_F c_M^{-1})k_M t_M, \quad (33)$$

где

$$c_O = \frac{c_K \cdot c_M}{c_K + c_M}; \quad c_F = \frac{c_B \cdot c_O}{c_B + c_O}.$$

С учетом выражений (31), (32) для усилий в обмотках, усилия в магнитной системе,

приходящегося на один стержень с обмотками, усилий в верхнем и нижнем элементах крепления блока обмоток, а также суммарного усилия в шпильках, стягивающих верхнее и нижнее прессующие кольца, будем иметь такие выражения:

$$N_i = N_{0i} - c_i [(D_B + c_O k_M t_M)(c_B + c_O)^{-1} - k t_i \cdot t_i - k w_i \cdot w_i]; \quad (35)$$

$$N_M = P_1 = P_2 = (D_B c_B^{-1} - k_M t_M) \cdot c_F; \quad (36)$$

$$P_s = P_r + c_s [(D_B c_B^{-1} - k_M t_M) \cdot c_F c_{K1}^{-1} + k_s t_s]. \quad (37)$$

Если в выражениях (31)...(37) принять  $c_M \rightarrow \infty$ , как и следовало ожидать, получим формулы (22)...(28).

Из полученных выражений видно, что при изменении температуры активной части и влагосодержания изоляционных материалов возникнут усилия в элементах крепления блока обмоток и, как следствие, в магнитной системе. Через элементы крепления блока обмоток на магнитную систему также будут передаваться усилия, возникающие в обмотках при КЗ. Все это будет сопровождаться деформациями магнитной системы, что приведет к увеличению потерь в электротехнической стали. Для устранения таких нежелательных явлений блок обмоток можно фиксировать только на нижнем яре. Верхний элемент крепления блока обмоток в этом случае не ставится, поэтому его жесткость следует принять равной нулю. Полагая в полученных результатах  $c_{K1} = 0$ , имеем

$$u_{K1} = -D_B c_B^{-1}; \quad u_{K2} = 0; \quad N_M = P_1 = P_2 = 0; \quad N_i = N_{0i} - c_i [D_B c_B^{-1} - k t_i \cdot t_i - k w_i \cdot w_i]. \quad (38)$$

На основе выражений (38) определены усилия в обмотках ряда трансформаторов серии 110 кВ. Результаты представлены в таблице, где  $N_{0i}$  – усилия в обмотках после запрессовки при средней температуре всех элементов 323 К;  $N_i$  – усилия в обмотках во время эксплуатации при их средней температуре 368 К и средней температуре шпилек 358 К;  $N t r_i$  – усилия в обмотках во время транспортирования при средней температуре всех элементов 248 К;  $N w_i$  – усилия в обмотках после увеличения на 0,5 % влагосодержания их изоляционных материалов и средней температуре всех элементов 323 К;  $P t r_i$  – силы прессовки обмоток, необходимые для предотвращения их смещения во время транспортирования при ускорениях, равных 3g. Для расчета коэффициентов жесткости и линейного расширения обмоток и шпилек при изменении температуры использовались выражения, приведенные в работы [2]. Аналогично определялись коэффициенты линейного расширения обмоток, вызванные изменением влагосодержания изоляционных материалов. В первом приближении считалось, что изменение влагосодержания изоляционных материалов на 1 % вызывает деформацию, равную также 1 %. Как видим, при повышении температуры во время эксплуатации усилия

Трансформатор	Обмотка	$c_i 10^{-7}$ , Nm <sup>-1</sup>	$kt_i 10^5$ , mK <sup>-1</sup>	$kw_i 10^3$ , m	$c_s 10^{-8}$ , Nm <sup>-1</sup>	$k_s 10^5$ , mK <sup>-1</sup>	$N_{0i}$ , kN	$N_i$ , kN	$N_{tr_i}$ , kN	$P_{tr_i}$ , kN	$Nw_i$ , kN
ТРДН-40000/110	НН	6.170	3.667	4.598	3.161	2.147	128.6	166.1	79.92	56.88	214.5
	ВН	5.555	4.031	6.850			155.5	198.4	96.50	69.50	295.3
	РО	7.091	2.678	3540			49.04	60.59	45.70	18.31	110.2
ТРДН-63000/110	НН	5.272	4.361	6.441	2.808	2.417	134.4	174.2	80.69	71.42	250.4
	ВН	6.904	4.293	5.898			155.6	205.6	88.79	98.41	288.7
	РО	7.120	3.056	3.100			58.00	69.91	55.14	22.82	95.66
ТРДН-80000/110	НН	5.994	4.677	6.194	2.544	2.667	147.8	191.6	90.51	102.5	260.3
	ВН	6.327	4.661	6.194			163.2	208.9	103.4	123.7	281.9
	РО	5.730	3.934	5.210			57.1	79.78	34.20	28.11	136.4

сжатия в обмотках увеличиваются в среднем (по всем трансформаторам) на 29 %. Это положительно сказывается на стойкости обмоток к действию радиальных сжимающих сил КЗ. Снижение температуры при транспортировании приводит к уменьшению усилий сжатия в обмотках (в среднем на 32 %). В некоторых случаях эти усилия могут оказаться меньшими, чем силы прессовки обмоток, необходимые для предотвращения их смещения при ускорениях во время транспортирования. Последнее не допустимо, так как вследствие смещения обмоток могут нарушиться изоляционные промежутки, что может стать причиной аварии. Очевидно, силы прессовки обмоток следует выбирать с учетом исключения их смещения во время транспортирования. Увеличение влагосодержания изоляции обмоток приводит к сильному увеличению усилий сжатия (для рассмотренных трансформаторов в среднем на 90 %). Следовательно, активную часть трансформатора нельзя долго оставлять на открытом воздухе, так как увлажнение изоляции обмоток может привести к разрушению прессующей конструкции.

**Выводы.** Разработан метод определения усилий в обмотках при запрессовке общим прессующим кольцом с учетом разновысокости. Получены выражения для расчета усилий в обмотках при изменении их температуры и влагосодержания изоляционных материалов. На примере ряда трансформаторов серии 110 кВ изучено влияние температуры обмоток и влагосодержания их изоляционных материалов на осевые усилия. Согласно полученным результатам указанные факторы при рассмотренной прессующей конструкции значительно влияют на осевые усилия в обмотках. Это следует учитывать при практических расчетах трансформаторов.

*Рассмотрены трансформаторы стержневого типа, в которых все обмотки одного стержня расположены между общими верхним и нижним прессующими элементами (плитами, кольцами), стянутыми с помощью вертикальных шпилек. Определены усилия, возникающие в разновысоких обмотках во время запрессовки. Получены выражения для определения усилий в обмотках при изменении их температуры и влагосодержания изоляционных материалов. На числовых примерах изучено влияние на эти усилия изменения температуры обмоток и влагосодержания в изоляционных материалах.*

*Core type transformers, in which all windings of the same limb are arranged between common top and bottom pressing elements (i.e. plates, rings) tied by means of vertical studs, were considered. The internal forces emerging in equally high windings during clamping were determined. There were obtained expressions for determining internal forces in windings under variation of their temperature and moisture content of insulation materials. On numerical examples was investigated influence of windings temperature and moisture content of insulation materials variation upon these internal forces.*

1. Лазарев В.І. Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення): Дис ... докт. техн. наук. – Київ, 2006. – 605 с.
2. Лазарев В.І., Зубкова І.В. Определение усилий в элементах механической системы однофазного одно-стержневого шунтирующего реактора с боковыми ярмами при изменении температуры, подъеме активной части и транспортировании // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ. – 2005. – № 3(12). – С. 124–132.

3. *Лазарев В.И., Лазарев И.В.* Об устойчивости сжимаемых обмоток трансформаторов как сложных деформируемых систем с начальными усилиями и трением. Критические напряжения радиальной устойчивости (Сообщение 1) // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – № 1. – С. 64–68.
4. *Лазарев В.И., Лазарев И.В.* О причине уменьшения сил осевой прессовки обмоток трансформаторов при коротких замыканиях // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 18–22.
5. *Лазарев В.И., Лазарев И.В.* Об устойчивости сжимаемых обмоток трансформаторов как сложных деформируемых систем с начальными усилиями и трением. Анализ критических напряжений радиальной устойчивости (Сообщение 2) // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2006. – № 1. – С. 37–42.
6. *Носачев В.А., Соколова Л.И.* Деформация изоляционных материалов из целлюлозы в обмотках мощных силовых трансформаторов // Электротехника. – 1980. – № 8. – С. 54–57.
7. *Комп'ютерна програма “Розрахунок електродинамічної стійкості обмоток трансформаторів при короткому замиканні” (“ELDINST 2.0”):* Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 11667 Україна / В.І. Лазарев, П.Г. Кохан, О.Л. Тарчуткін, О.В. Артьомченко, М.В. Остренко, Т.С. Молдован, В.П. Семусева (Україна). – Дата реєстрації 30.11.04.
8. *Ch. Krause, W. Goetz.* The Change of the Clamping Pressure in Transformer Winding due to Variation of the Moisture Content – Tests with pressboard spacer stacks // CIGRE, Transformer colloquium 1999 in Budapest.

Надійшла 01.08.2008