

ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЕЕ ПОДЪЕМАХ И ОПУСКАНИЯХ С ПОСЛЕДУЮЩИМИ ПОДПРЕССОВКАМИ ОБМОТОК

Лазарев И. В., Шевченко В. Г.

Влияние сухого трения на силы прессовки обмоток имеет большое значение для трансформаторов с активной частью наиболее распространенной традиционной конструкции, в которой ярмовые балки используются для прессовки как обмоток, так магнитопровода. С учетом сил трения между ярмовыми балками и ярмом определены закономерности для расчета усилий в элементах активной части трансформатора стержневого типа при ее многократных подъемах и опусканиях с последующими подпрессовками обмоток. Показано, что путем подпрессовок обмоток можно уменьшить или вообще устранить снижение их сил осевого сжатия. На примере ряда трансформаторов серии 100 kV показано, что силы сухого трения между ярмовыми балками и ярмом существенно влияют на осевые усилия в обмотках при традиционной конструкции активной части.

Вплив сухого тертя на сили пресування обмоток має велике значення для трансформаторів з активною частиною найбільш розповсюдженої традиційної конструкції, в якій ярмові балки використовуються для пресування як обмоток, так і магнітопроводу. З урахуванням сил тертя між ярмовими балками та ярмом визначено закономірності для розрахунку зусиль в елементах активної частини трансформатора стрижневого типу при її багатократних підйомах та опусканнях з подальшими підпресуваннями обмоток. Показано, що шляхом підпресувань обмоток можна зменшити або взагалі усунути зниження їх сил осьового стиску. На прикладі ряду трансформаторів серії 110 kV показано, що сили сухого тертя між ярмовими балками та ярмом суттєво впливають на осьові зусилля в обмотках при традиційній конструкції активної частини.

The effect of dry friction upon windings clamping forces is of great importance for the transformers with the most widely used traditional active design in which the yoke beams are utilised both for clamping windings and the core. With regard to the forces of friction between the yoke beams and magnetic system yoke, there were determined dependencies for calculating internal forces in the core-type transformer active part elements after repeated lifting and lowering of the active part with subsequent additional clamping of the windings. It was demonstrated that by means of the compensatory clamping of windings it is possible to decrease or completely prevent the reduction of their compressive internal forces. As exemplified by a set of 110kV series transformers, it was demonstrated that the forces of dry friction between the yoke beams and magnetic system yoke have a substantial effect upon the internal forces in windings in the traditional active part design.

Лазарев И. В.

ст. научн. сотр.
ПАО «ВИТ» «УНИПКИТИТ»
oemi@vit.zp.ua

Шевченко В. Г.

канд. техн. наук, доц.,
зав. каф. «Механика» ЗНТУ

ПАО «ВИТ» «УНИПКИТИТ» – ПАО «ВИТ» «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения», г. Запорожье;

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

УДК 621.314.21.045.001.5

Лазарев И. В., Шевченко В. Г.

ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЕЕ ПОДЪЕМАХ И ОПУСКАНИЯХ С ПОСЛЕДУЮЩИМИ ПОДПРЕССОВКАМИ ОБМОТОК

Силы прессовки обмоток играют важную роль в обеспечении стойкости трансформаторов к действию электромагнитных сил, вызванных токами короткого замыкания. В работе [1] рассмотрены процессы, происходящие в трансформаторах с активной частью (а.ч.) наиболее распространенной традиционной конструкции (где ярмовые балки используются для прессовки как обмоток, так и магнитопровода) при однократном подъеме и опускании а.ч. Было показано, что силы сухого трения между ярмом и ярмовыми балками являются одним из основных факторов, влияющих на силы прессовки обмоток и приводящих к их снижению, выявленному в большинстве трансформаторов в процессе капитальных ремонтов и после испытаний [2–4]. Однако, подъем и опускание а.ч. трансформатора с последующей подпрессовкой обмоток могут происходить многократно. На такие случаи результаты работы [1] не распространяются.

Целью работы является определение усилий в элементах крепления ярмовых балок и обмотках трансформаторов с а.ч. традиционной конструкции после многократных подъемов и опусканий а.ч. с последующей подпрессовкой обмоток.

Рассмотрим процесс запрессовки обмоток с помощью ярмовых балок. Используем схему на рис. 1, где: 1 – безинерционная пружина, моделирующая обмотки; 2 – жесткий элемент, эквивалентный прессующим кольцам; 3 – гидроцилиндр; 4 – жесткий элемент, представляющий ярмовые балки (верхние); 5 – безинерционная пружина, соответствующая элементам крепления ярмовых балок.

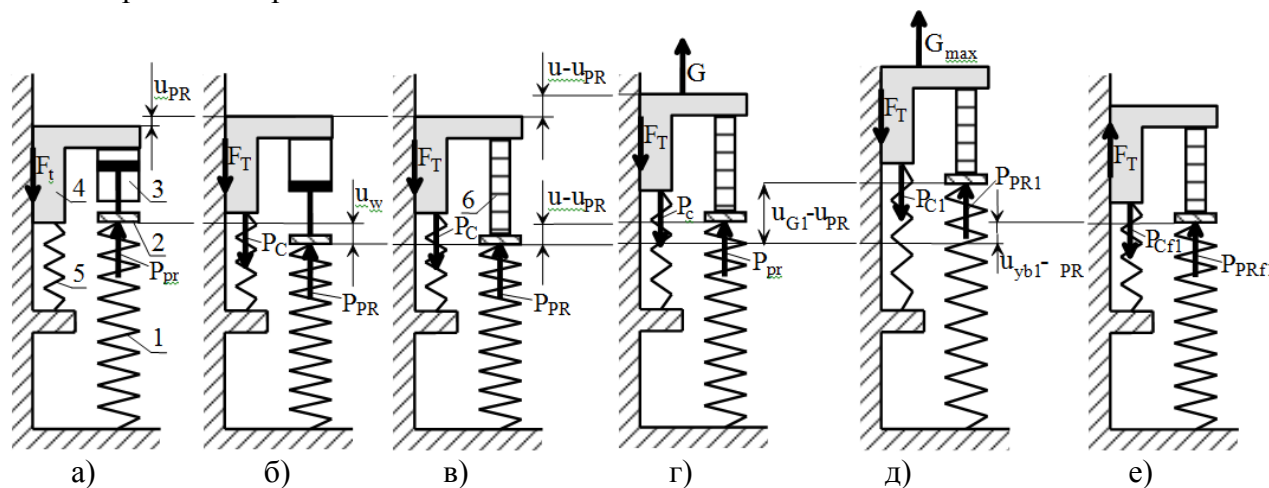


Рис 1. Процесс запрессовки обмоток, подъема и опускания а.ч.

Здесь и далее будем рассматривать один стержень магнитной системы с расположенными на нем обмотками, запрессованными общими верхним и нижним прессующими кольцами. Все величины, характеризующие изучаемые процессы, относятся к одному стержню магнитной системы.

Запрессовка обмоток производится путем увеличения давления в гидроцилиндре 3. В большинстве случаев сила прессовки обмоток P_{PR} крупных силовых трансформаторов превышает максимальную силу трения покоя F_T между ярмом и ярмовыми балками, прижатыми к нему с помощью специальных шпилек или полубандажей. В процессе запрессовки

возникают две равные по величине, но направленные противоположно силы. Одна из этих сил, приложенная к прессующему кольцу, сжимает обмотки. Вторая действует на ярмовые балки и стремится сдвинуть их относительно ярма вверх (рис. 1). Силу, сжимающую обмотки, будем называть силой прессовки обмоток, а стремящуюся сдвинуть ярмовые балки, – просто силой прессовки. Обе силы обозначим P_{pr} . Пока $|P_{pr}| \leq |F_T|$, ярмовые балки остаются неподвижными, элементы крепления ярмовых балок не деформируются и дополнительное усилие в них не возникает: $P_C = 0$. Сила P_{pr} будет уравниваться силой трения покоя между ярмом и ярмовыми балками F_t (рис.1, а). Условие равновесия ярмовых балок (в проекции на направленную вверх вертикальную ось) имеет вид

$$P_{pr} + F_t = 0 \quad (|P_{pr}| \leq |F_T|). \quad (1)$$

Согласно (1) $|F_t| = |P_{pr}|$ ($|P_{pr}| \leq |F_T|$).

В случае $|P_{PR}| > |F_T|$, в процессе запрессовки обмоток сила P_{pr} превзойдет по модулю F_T . В момент, когда P_{pr} превысит по модулю F_T , ярмовые балки начнут двигаться вверх (относительно ярма), вызывая деформации элементов их крепления 5 (рис. 1). При движении ярмовых балок сила трения по абсолютной величине будет равна максимальной силе трения покоя и направлена вниз (против движения) $F_t = -F_T$ ($|P_{pr}| > |F_T|$).

В этом случае условие равновесия ярмовых балок примет вид:

$$P_{pr} - F_T + P_C = 0. \quad (2)$$

Усилие P_C пропорционально вертикальному перемещению ярмовых балок u (удалению от положения до запрессовки обмоток), но направлено в противоположную сторону:

$$P_C = -c_y u \quad (u \geq 0), \quad (3)$$

где c_y – коэффициент жесткости элементов крепления ярмовых балок.

С учетом выражений (2), (3) получим такую зависимость:

$$P_{pr} = F_T + c_y u \quad (u \geq 0). \quad (4)$$

После окончательной запрессовки обмоток сила $P_{pr} = P_{PR}$ будет уравниваться окончательной силой трения F_{tf} , равной по модулю F_T

$$F_{tf} = -F_T \quad (|P_{PR}| > |F_T|), \quad (5)$$

и усилием P_C при максимальном вертикальном перемещении ярмовых балок u_{PR} (рис.1, б)

$$P_C = -c_y u_{PR} \quad (u_{PR} \geq 0). \quad (6)$$

Условие равновесия ярмовых балок после окончательной запрессовки обмоток:

$$P_{PR} - F_T + P_C = 0. \quad (7)$$

Используя выражения (6), (7), получим

$$P_C = F_T - P_{PR} \quad (|P_{PR}| > |F_T|), \quad (8)$$

$$u_{PR} = (P_{PR} - F_T) \cdot c_y^{-1}. \quad (9)$$

В момент полной запрессовки обмоток будет иметь место наибольшая деформация (абсолютная) их сжатия u_w (рис.1, б), которой соответствует P_{PR} , по модулю равная

$$P_{PR} = c_w u_w, \quad (10)$$

где c_w – коэффициент жесткости обмоток, равный сумме коэффициентов жесткости отдельных обмоток c_i ,

$$c_w = \sum_{i=1}^N c_i; \quad (11)$$

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

После окончательной запрессовки обмоток гидроцилиндры 3 заменяются постоянными элементами 6 (рис.1, в), что не приводит к изменению положения или деформации элементов а.ч. Усилия в них останутся такими, как в момент полной запрессовки обмоток. Справедливо условие (7). Таким образом, формулы (8) и (5) служат для определения окончательных сил в элементах а.ч. после запрессовки обмоток

При подъеме а.ч. за верхние ярмовые балки, на них будет действовать направленная вверх сила G , максимальная величина которой G_{\max} равна весу а.ч., уменьшенному на вес верхних ярмовых балок (на один стержень магнитной системы с расположенными на нем обмотками).

В случае $|P_{PR}| > |F_T|$ при подъеме а.ч. ярмовые балки сразу начнут двигаться вверх, что приведет к распрессовке обмоток и увеличению усилия в элементах крепления ярмовых балок. Условие равновесия ярмовых балок (рис.1, г) имеет вид:

$$G + P_{pr} - F_T + P_c = 0 \left(|P_{PR}| + |G| > |F_T| \right), \quad (12)$$

Здесь сила прессовки P_{pr} , действующая на ярмовые балки (сила прессовки обмоток), и усилие в элементах крепления ярмовых балок P_c , определяются выражениями

$$P_{pr} = P_{PR} - c_w(u - u_{PR})(u \geq u_{PR}); \quad (13)$$

$$P_c = P_C - c_y(u - u_{PR})(u \geq u_{PR}). \quad (14)$$

Подставляя (13), (14) в уравнение (12), с учетом соотношения (7), получим зависимость между силой G и вертикальным перемещением ярмовых балок u

$$G(u) = (c_y + c_w)(u - u_{PR}) \quad (u \geq u_{PR}). \quad (15)$$

Наибольшее вертикальное перемещение ярмовых балок при подъеме а.ч. u_{G1} (рис. 1, д) будет иметь такую величину, при которой выполняется условие равновесия

$$P_{PR1} + G_{\max} - F_T + P_{C1} = 0, \quad (16)$$

где P_{PR1} – минимальная сила прессовки обмоток при подъеме а.ч.; P_{C1} – наибольшая сила в элементах крепления ярмовых балок при подъеме а.ч.

Для определения входящих в (16) сил используем (13), (14), подставив в них $u = u_{G1}$. С учетом (7) для P_{PR1} , P_{C1} и наибольшего вертикального перемещения ярмовых балок при подъеме а.ч. и в этом случае ($|P_{PR}| > |F_T|$) получим следующие выражения:

$$P_{PR1} = P_{PR} - c_w u_G; \quad (17)$$

$$P_{C1} = P_C - c_y u_G; \quad (18)$$

$$u_{G1} = u_{PR} + u_G, \quad (19)$$

Здесь u_{PR} определяется соотношением (9), а u_G рассчитывается по формуле

$$u_G = G_{\max} (c_y + c_w)^{-1}. \quad (20)$$

В процессе опускания а.ч. сила G будет уменьшаться от G_{\max} до нуля. Если $|P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$, что согласно (16) имеет место при $|G_{\max}| \leq |2F_T|$, то уменьшение G до

нуля не приведет к движению ярмовых балок. Они останутся в крайнем верхнем положении. Следовательно, и здесь $P_{PRf1} = P_{PR1}$, $|P_{PR1}| < |P_{PR}|$. Окончательное усилие в элементах крепления ярмовых балок P_{Cf1} останется равным $P_{Cf1} = P_{C1}$. С учетом (20) для определения P_{PRf1} и P_{Cf1} после подъема и опускания а.ч. в рассматриваемом случае ($|P_{PR}| > |F_T|$; $|P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$) получим:

$$P_{PRf1} = P_{PR} - G_{\max} c_w (c_y + c_w)^{-1}; \quad (21)$$

$$P_{Cf1} = P_C - G_{\max} c_y (c_y + c_w)^{-1}. \quad (22)$$

И в этом случае ($|P_{PR}| > |F_T|$) сила трения между ярмовыми балками и ярмом в процессе опускания а.ч. при $|G_{\max}| \leq |F_T|$ будет оставаться направленной вниз, а по модулю уменьшится от максимального значения до $|F_T| - |G_{\max}|$. То есть для окончательной силы трения между ярмовыми балками и ярмом справедливо выражение

$$F_{f1} = G_{\max} - F_T. \quad (23)$$

При $|F_T| < |G_{\max}| \leq |2F_T|$ сила трения между ярмовыми балками и ярмом, направленная вниз, вначале будет уменьшаться от $|F_T|$ до нуля. Затем она изменит свое направление на противоположное и начнет увеличиваться по модулю до $|G_{\max}| - |F_T|$. Окончательная сила трения между ярмовыми балками и ярмом по-прежнему будет определяться согласно (23).

При $|P_{C1}| - |P_{PR1}| > |F_T|$, чему согласно (16), соответствует условие $|2F_T| < |G_{\max}|$, уменьшение G до нуля будет сопровождаться движением ярмовых балок вниз. Окончательное перемещение ярмовых балок относительно их начального положения (до запрессовки обмоток) u_{yb1} (рис.1, е) примет значение, при котором справедливо условие равновесия

$$P_{PRf1} + F_T + P_{Cf1} = 0. \quad (24)$$

Для определения сил, входящих в (24), используем (13), (14), подставив в них $u = u_{yb1}$. С учетом (7), (24) в рассматриваемом случае ($|P_{PR}| > |F_T|$; $|P_{C1}| - |P_{PR1}| > |F_T|$) получим

$$P_{PRf1} = P_{PR} - c_w u_{yb}; \quad (25)$$

$$P_{Cf1} = P_C - c_y u_{yb}; \quad (26)$$

$$u_{yb1} = u_{PR} + u_{yb}, \quad (27)$$

в которых

$$u_{yb} = 2F_T (c_y + c_w)^{-1}. \quad (28)$$

С учетом выражения (28) окончательно будем иметь

$$P_{PRf1} = P_{PR} - 2F_T c_w (c_y + c_w)^{-1}; \quad (29)$$

$$P_{Cf1} = P_C - 2F_T c_y (c_y + c_w)^{-1}. \quad (30)$$

Из (29) видно, что $|P_{PRf1}| < |P_{PR}|$. Окончательное усилие в элементах крепления ярмовых балок $|P_{Cf1}| > |P_C|$ (30).

При опускании а.ч. сила трения между ярмовыми балками и ярмом будет меняться следующим образом. При уменьшении модуля G от $|G_{\max}|$ до $|G_{\max}| - |2F_T|$ вначале она, оставаясь направленной вниз, будет уменьшаться по модулю от $|F_T|$ до нуля. После чего эта

сила изменит направление на противоположное, и по модулю будет увеличиваться от нуля до $|F_T|$. При дальнейшем уменьшении G начнется движение ярмовых балок вниз. Сила трения между ярмом и ярмовыми балками будет направлена вверх (против движения) и по модулю равна $|F_T|$. Она сохранит это направление и модуль после остановки ярмовых балок. Таким образом,

$$F_{if1} = F_T. \quad (31)$$

При этом распрессовка обмоток во всех рассмотренных случаях (21), (29) тем больше, чем больше их жесткость и меньше жесткость прессующей конструкции. Увеличение модуля окончательного усилия в элементах крепления верхних ярмовых балок в этих случаях (22), (30), наоборот, тем больше, чем больше их жесткость и меньше жесткость обмоток. Распрессовка обмоток и увеличение модуля усилия в элементах крепления ярмовых балок обусловлены тем, что после подъема и опускания а.ч. сила трения между ярмом и ярмовыми балками не дает последним вернуться в их положение после начальной запрессовки обмоток.

Согласно (13), полная распрессовка обмоток при подъеме а.ч. произойдет, если наибольшее вертикальное перемещение ярмовых балок u_{G1} достигнет или превзойдет значение

$$u_{G10} = u_{PR} + P_{PR}c_w^{-1} \quad (32)$$

при выполнении условия $|F_T| < |P_{PR}|$.

Действующее на ярмовые балки вертикальное усилие, при котором во время подъема а.ч. произойдет полная распрессовка обмоток, G_{10} определяется по (7) после подстановки в него наибольшего вертикального перемещения из (32) и равно:

$$G_{10} = P_{PR} + P_{PR}c_y c_w^{-1}, \quad (33)$$

если выполняется условие $|F_T| < |P_{PR}|$.

Полученные результаты говорят о том, что после опускания а.ч. в случае $|G_{10}| \leq |2F_T| \leftrightarrow |P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$ обмотки останутся полностью распрессованными. При $|2F_T| \leq |G_{10}| \leftrightarrow |F_T| \leq |P_{C1}| - |P_{PR1}|$ после опускания а.ч. ярмовые балки переместятся вниз под действием усилий в элементах их крепления, вследствие чего произойдет подпрессовка обмоток до силы P_{PRf1} , определяемой (29) для случая $|F_T| < |P_{PR}|$.

Из представленных результатов видно, что при условии $|2F_T| < |G_{\max}|$ окончательные сила прессовки обмоток, усилие в элементах крепления ярмовых балок и сила трения между ярмовыми балками и ярмом не зависят от величины G_{\max} (формулы (29), (30)).

После подъема и опускания а.ч. может быть произведена подпрессовка обмоток. Из (21), (29) видно, насколько они распрессовались в каждом случае. На основе этих выражений можно показать, что изменения силы прессовки обмоток ΔP_{PR} при опускании а.ч. во всех случаях по модулю меньше изменений модуля силы трения между ярмовыми балками и ярмом ΔF_t . Доказательства представлены в табл. 1. В ней и в дальнейшем принято:

$$K_y = c_y (c_y + c_w)^{-1}; \quad (34)$$

$$K_w = c_w (c_y + c_w)^{-1}. \quad (35)$$

Таблица 1

Соотношения между абсолютными величинами изменения силы прессовки и силы трения между ярмовыми балками и ярмом при опускании а.ч.

Изменение силы трения	Доказательство
$ \Delta F_t = G_{\max} $	$\left\{ \begin{array}{l} 0 < K_w < 1 \\ c_y > 0, c_w > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta P_{PR1} = K_w G_{\max} < G_{\max} $
$ \Delta F_t = 2F_T $	$\left\{ \begin{array}{l} 0 < K_w < 1 \\ c_y > 0, c_w > 0 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta P_{PR1} = K_w 2F_T < 2F_T $

При опускании а.ч. (уменьшении G от G_{\max} до нуля) сила трения между ярмовыми балками и ярмом увеличивается от $-F_T$ до $-F_T + \Delta F_t$. Во время подпрессовки обмоток эта сила уменьшится на ΔP_{PR1} , так как на такую же величину вырастет сила прессовки обмоток. То есть в процессе подпрессовки обмоток сила трения уменьшится от $-F_T + \Delta F_t$ до значения

$$F_{t1f} = -F_T + \Delta F_t - \Delta P_{PR1}. \quad (36)$$

Поскольку $|\Delta P_{PR1}| < |\Delta F_t| < |2F_T|$, то при изменении силы трения в процессе подпрессовки обмоток на ΔP_{PR1} ярмовые балки перемещаться не будут. В результате усилие в элементах крепления ярмовых балок не изменится. Окончательная сила прессовки обмоток $P_{PRf1} = P_{PR}$. Окончательные выражения для сил в элементах а.ч. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Окончательные силы после подпрессовки обмоток для ликвидации их распрессовки при подъеме и опускании а. ч. трансформатора

Условия при запрессовке обмоток, подъеме и опускании а.ч. трансформатора	Окончательные силы в элементах а.ч. трансформатора
$ G_{\max} \leq 2F_T $ $ P_{C1} - P_{PR1} \leq F_T $	$P_{PR1f} = P_{PR} \quad (37)$
	$P_{C1f} = P_C - K_y G_{\max} \quad (38)$
	$F_{t1f} = K_y (G_{\max} - F_T) - K_w F_T \quad (39)$
$ 2F_T < G_{\max} $ $ P_{C1} - P_{PR1} > F_T $	$P_{PR1f} = P_{PR} \quad (40)$
	$P_{C1f} = P_C - K_y 2F_T \quad (41)$
	$F_{t1f} = (K_y - K_w) F_T \quad (42)$

Путем обобщения полученных результатов были определены силы, возникающие в элементах а.ч. после i -го подъема и опускания а.ч. для случая, когда все предыдущие подъемы и опускания сопровождались подпрессовкой обмоток. Результаты показаны в табл. 3. Табл. 4 содержит силы в элементах а.ч., возникшие после подпрессовки обмоток.

Полученные результаты подтверждают выводы работы [1] о том, что путем повторных подъемов и опусканий а.ч. с подпрессовкой обмоток можно практически исключить распрессовку обмоток.

Таблица 3

Окончательные силы при распрессовке обмоток вследствие i -го подъема и опускания а.ч.

Условия при запрессовке обмоток, подъеме и опускании а.ч.	Окончательные перемещения и силы в элементах а.ч.
$ G_{\max} \leq 2F_T $ $ P_{C1} - P_{PR1} \leq F_T $	$u_{Gi} = u_{Gi-1} + K_w^{i-1} u_G \quad (43)$ $u_{PR} = (P_{PR} - F_T) c_y^{-1} \quad (9)$ $u_G = G_{\max} (c_y + c_w)^{-1} \quad (20)$ $P_{PRfi} = P_{PR} - K_w^{i-1} c_w u_G \quad (44)$ $P_{Cfi} = P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_G \quad (45)$ $P_C = P_{PR} - F_T \quad (8)$ $F_{tifi} = G_{\max} - F_T \quad (46)$
$ 2F_T < G_{\max} $ $ P_{C1} - P_{PR1} > F_T $	$u_{ybi} = u_{ybi-1} + K_w^{i-1} u_{yb} \quad (47)$ $u_{PR} = (P_{PR} - F_T) c_y^{-1} \quad (9)$ $u_{yb} = 2F_T (c_y + c_w)^{-1} \quad (28)$ $P_{PRfi} = P_{PR} - K_w^{i-1} c_w u_{yb} \quad (48)$ $P_{Cfi} = P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_{yb} \quad (49)$ $P_C = P_{PR} - F_T \quad (8)$ $F_{tifi} = F_T \quad (50)$

Таблица 4

Окончательные силы после подпрессовки обмоток для ликвидации их распрессовки при i -м подъеме и опускании а. ч.

Условия при запрессовке обмоток, подъеме и опускании а.ч.	Окончательные силы в элементах а.ч.
$ G_{\max} \leq 2F_T $ $ P_{C1} - P_{PR1} \leq F_T $	$P_{PRif} = P_{PR} \quad (51)$ $P_{Cfi} = P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_G \quad (45)$ $P_C = P_{PR} - F_T \quad (8)$ $u_G = G_{\max} (c_y + c_w)^{-1} \quad (20)$ $F_{tifi} = G_{\max} - F_T - K_w^{i-1} c_w u_G \quad (52)$
$ 2F_T < G_{\max} $ $ P_{C1} - P_{PR1} > F_T $	$P_{PRif} = P_{PR} \quad (51)$ $P_{Cfi} = P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_{yb} \quad (49)$ $P_C = P_{PR} - F_T \quad (8)$ $u_{yb} = 2F_T (c_y + c_w)^{-1} \quad (28)$ $F_{tifi} = F_T - K_w^{i-1} c_w u_{yb} \quad (53)$

С помощью полученных результатов были рассчитаны усилия в обмотках ряда трансформаторов серии 110 kV после подъема и опускания а.ч. Массы а.ч. M имеют такие значения: 31860, 43350, 54480 kg. Соответствующие величины G_{\max} (на один стержень магнитной системы) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета усилий в обмотках после подъема и опускания а.ч.

Трансформатор	Обмотка	c_i $\times 10^{-7}$, $\frac{N}{m}$	c_y $\times 10^{-8}$, $\frac{N}{m}$	P_{PR} , G_{\max} , kN	N_{0i} , kN	F_{1T} , $2 \cdot F_{1T}$, kN	P_{1PR} , kN	N_{1i} , kN	F_{2T} , $2 \cdot F_{2T}$, kN	P_{2PR} , kN	N_{2i} , kN
ТРДН-40000/110	НН	6.170	3.267	333.1, 101.0	128.6	46.33, 92.66	299.3 -10%	117.5 -9%	92.66, 185.3	296.2 -11%	116.5 -9%
	ВН	5.555			155.5			145.5 -6%			144.6 -7%
	РО	7.091			49.04			36.28 -26%			35.13 -28%
ТРДН-63000/110	НН	5.272	4.417	348.0, 138.0	134.4	48.32, 96.64	318.6 -8%	126.4 -6%	96.64, 193.3	306.0 -12%	122.9 -9%
	ВН	6.904			155.6			145.1 -7%			140.6 -10%
	РО	7.120			58.00			47.16 -19%			42.52 -27%
ТРДН-80000/110	НН	5.994	3.909	368.1 175.0	147.8	63.18, 126.4	328.2 -11%	134.6 -9%	126.4, 252.8	306.3 -15%	129.5 -12%
	ВН	6.327			163.2			149.2 -9%			143.8 -12%
	РО	5.730			57.1			44.43 -22%			39.55 -31%

В табл. 5 приняты следующие обозначения: N_{0i} – усилия в обмотках после запрессовки при средней температуре всех элементов а.ч. 50°C; F_{1T} , F_{2T} – максимальные силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом при давлении между пластинами в средних пакетах ярм равных 0.15 МПа и 0.30 МПа; P_{1PR} , P_{2PR} – силы прессовки обмоток после подъема и опускания а.ч.; N_{1i} , N_{2i} – осевые усилия в обмотках после подъема и опускания а.ч.; в процентах указаны изменения сил прессовки обмоток и осевых усилий в обмотках после подъема и опускания а.ч. по отношению к их начальным значениям (после запрессовки обмоток при средней температуре всех элементов а.ч. 50°C).

Результаты, представленные в табл. 5, показывают, что при давлении между пластинами средних пакетов ярм $\sigma_0 = 0.15$ МПа уменьшение сил прессовки обмоток после подъема и опускания а.ч. в среднем составило 10%. В отдельных обмотках осевые усилия сжатия уменьшились на 6 – 26%. Увеличение давления между пластинами средних пакетов ярм до $\sigma_0 = 0.30$ МПа, при котором максимальные силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмами также увеличились в два раза, повлекло за собой дополнительное уменьшение сил осевой прессовки обмоток и осевых усилий в отдельных обмотках. Полученные результаты

подтверждают выводы статьи [1] о том, что за счет сил трения между ярмовыми балками и ярмом при подъеме и опускании а.ч. может произойти значительная распрессовка обмоток.

ВЫВОДЫ

1. Получены выражения для определения осевых усилий в обмотках, усилий в элементах прессовки и элементах крепления ярмовых балок, а также сил трения между ярмовыми балками и ярмом в процессе:

- запрессовки обмоток;
- подъема и опускания а.ч. трансформатора;
- подпрессовки обмоток после подъема и опускания а.ч. трансформатора;
- последующих подъемов и опусканий а.ч. трансформатора.

2. Полученные результаты показали, что одной из причин распрессовки обмоток при подъемах и опусканиях а.ч. традиционной конструкции, являются силы сухого трения между ярмовыми балками и ярмом. При уменьшении возмущающих сил, вызвавших смещение ярмовых балок, силы трения изменяют свое направление на противоположное и не дают ярмовым балкам вернуться к их положению после запрессовки обмоток. Это приводит к снижению сил прессовки обмоток. Это снижение тем больше, чем больше жесткость обмоток и меньше жесткость элементов прессующей конструкции. Распрессовку обмоток можно уменьшить и даже устранить путем подпрессовки в процессе изготовления, испытаний или эксплуатации трансформаторов.

3. На примере ряда трансформаторов серии 110 kV изучено влияние сил трения между ярмовыми балками и ярмом на осевые усилия в обмотках. Указанный фактор при классической конструкции а.ч. трансформатора существенно влияет на осевые усилия в обмотках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев В. И. О причине уменьшения сил осевой прессовки обмоток трансформаторов при коротких замыканиях / В. И. Лазарев, И. В. Лазарев // *Электротехника та електроенергетика, Запоріжжя*. – 2005. – №1. – С. 18–22.
2. Горшун В. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов неостаточна // В. Горшун, Д. Капустин // *Новости электротехники (Санкт-Петербург, Россия)*. – 2003. – №3. – С. 34–37.
3. Лазарев И. В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора после коротких замыканий / И. В. Лазарев, В. Г. Шевченко // *Проблемы машиностроения*. – 2015. – №1. – С. 45–54.
4. Lazariev I. Axial Internal Forces in Power Transformer Active Part Elements under Windings Clamping, Variation of Temperature and Moisture Content / I. Lazariev // *12th International Conference Cum Exhibition on Transformers “Innovative Quest for Transformer Technology for Efficient and Reliable Power” (TRAFOSEM-2013), 15th November 2013 : India, CWIEME International Exhibition Centre, Bengaluru : Indian Transformer Manufacturers Association (ITMA)*. – P. 74–83.