

И. В. Лазарев

Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения» – ПАО «ВИТ», г. Запорожье;
e-mail: oemi@vit.zp.ua

Ключові слова: трансформатор, обмотка, осеві сили, експлуатація, транспортування, вміст вологи.

УДК 621.314.21.045.001.5

ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЗАПРЕССОВКЕ ОБМОТОК, ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглянуто трансформатори стрижневого типу, в яких пресування обмоток і торцевих ярем магнітної системи здійснюється за допомогою одних і тих же ярмових балок. З урахуванням сил тертя між ярмовими балками і ярмом визначено зусилля в елементах активної частини при змінюванні їх температури та вмісту вологи ізоляційних матеріалів. На числових прикладах вивчено вплив на зусилля в обмотках змінювання температури елементів активної частини та вмісту вологи в ізоляційних матеріалах.

Введение

Актуальность рассматриваемой проблемы раскрыта в публикации [1]. Там же дано определение осевых сил прессовки обмоток с учетом их разновысокости при использовании общего прессующего кольца. Изучено влияние температуры обмоток и влагосодержания изоляционных материалов на осевые усилия в обмотках в случае их блочной сборки. В настоящей публикации отражены результаты последующих исследований отмеченной проблемы. Рассмотрена наиболее распространенная конструкция активной части трансформатора, в которой с помощью одних и тех же ярмовых балок осуществляется прессовка как ярм магнитной системы, так и обмоток. При этом все обмотки одного стержня магнитной системы прессуются с помощью одного общего прессующего кольца (общих верхнего и нижнего прессующих колец). Верхнее прессующее кольцо через специальные элементы опирается только на ярмовые балки. Нижние торцы обмоток непосредственно или через общие элементы (прессующее кольцо или сегменты) опираются как на нижние ярмовые балки, так и нижнее торцовое ярмо. За счет опоры на нижнее торцовое ярмо перемещения нижних торцов обмоток при изменении усилий в них будут малы по сравнению с перемещениями верхних торцов (верхних прессующих колец). Это позволяет в первом приближении считать, что нижние торцы обмоток имеют абсолютно жесткую опору. С учетом этих упрощений для одного стержня магнитной системы с обмотками получим расчетную схему, изображенную на рис. 1. Элементами расчетной схемы являются: V – жесткое тело, моделирующее верхние ярмовые балки; R – жесткое тело, эквивалентное прессующему кольцу (в положении после запрессовки обмоток); M – деформируемое в направлении оси обмоток линейноупругое тело, соответствующее магнитной системе; $1, 2, \dots, i, \dots, N$ – линейноупругие стержни, представляющие обмотки [i – номер стержня (обмотки); N – количество стержней (обмоток) на одном стержне магнитной системы; номера стержней и обмоток совпадают]; c_y – безынерционная пружина, моделирующая элементы крепления ярмовых балок; c_r – безынерционная пружина, представляющая элементы, расположенные между прессующим кольцом и ярмовыми балками (элементы прессовки). Для безынерционных пружин влияние изменения температуры и влагосодержания соответствующих элементов не учитывается.

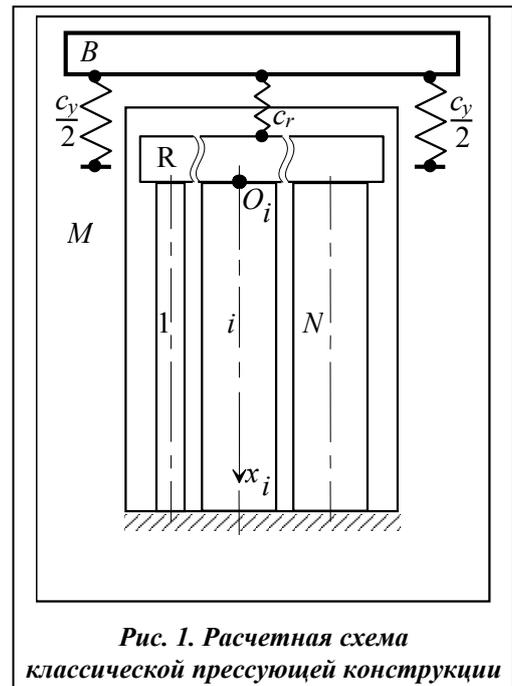
Запрессовка обмоток производится после сушки активной части трансформатора при средней температуре элементов, равной примерно 50 °С. Используются специальные гидравлические домкраты, устанавливаемые между верхними ярмовыми балками и прессующими кольцами [2]. Сила, возникающая в домкратах при повышении давления жидкости, через прессующие кольца сжимает обмотки. Такая же сила противоположного направления действует со стороны домкратов на верхние ярмовые балки. Согласно расчетам в трансформаторах рассматриваемой конструкции заданная суммарная окончательная сила прессовки обмоток P_{PR} превышает максимальную силу трения покоя ме-

жду ярмовыми балками и ярмом Fr . Следовательно, в какой-то момент сила, развиваемая в домкратах, станет равна максимальной силе трения покоя между ярмом и ярмовыми балками. С этого момента при дальнейшем увеличении давления жидкости в домкратах ярмовые балки начнут двигаться относительно яра вверх, вызывая деформации элементов их крепления (прессующие пластины, вертикальные шпильки, полубандажи и т. п.).

Вследствие деформации в этих элементах возникнут усилия, препятствующие перемещению ярмовых балок. При движении ярмовых балок относительно яра сила трения скольжения равна максимальной силе трения покоя (так как скорость скольжения мала). Когда сила в домкратах станет равной суммарной окончательной силе прессовки обмоток, процесс запрессовки прекращается. Между ярмовыми балками и прессующими кольцами устанавливаются элементы прессовки (например, бруски из ДСП). После этого гидравлические домкраты удаляются. Полное усилие в элементах прессовки равно суммарной окончательной силе прессовки обмоток. Проекция суммарного усилия в элементах крепления ярмовых балок на вертикальную ось (усилие в элементах крепления ярмовых балок) меньше полного усилия в элементах прессовки на величину максимальной силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом [2]. На графиках зависимостей между силами P , действующими на ярмовые балки, и их перемещением u_y (рис. 2) процессу запрессовки обмоток соответствует ломаная OAA_1 , представляющая изменение силы в гидравлических домкратах [2]. Линия OBB_1 показывает изменения силы трения между ярмовыми балками и ярмом. Точка O и отрезок OC_1 соответствуют усилию в элементах крепления ярмовых балок до начала их движения относительно яра и во время движения. Для определения сил прессовки в обмотках после запрессовки и в рассматриваемом случае будут справедливы результаты публикации [1].

В дальнейшем происходит остывание трансформатора, что приводит к уменьшению осевых усилий в обмотках. Обусловлено это тем, что обмотки имеют более высокие значения коэффициентов теплового линейного расширения в осевом направлении, чем остальные элементы активной части. Минимальная температура активной части может иметь очень низкие отрицательные значения, при которых осевые усилия сжатия обмоток уменьшатся настолько, что не смогут удержать их от смещений при ускорениях, возникающих во время транспортирования. Это одно из важных обстоятельств, требующих разработки методов определения осевых усилий в обмотках с учетом их температуры. В зависимости от минимальной температуры, до которой остынет активная часть, изменению усилия в элементах прессовки, равному суммарному усилию сжатия обмоток, на графиках рис. 2 могут соответствовать отрезки A_1A_2 или A_1A_3 , или ломаная $A_1A_4A_5$. Изменение силы трения между ярмовыми балками и ярмом будут представлять соответственно отрезки B_1B_2 , или B_1B_3 , или линия $B_1B_4B_5$. Усилию в элементах крепления ярмовых балок будут соответствовать точка C_1 и отрезок C_1C_2 .

В процессе эксплуатации трансформатора происходит нагрев трансформатора, сопровождающийся увеличением осевых усилий в обмотках. Средние значения температур элементов активной части могут быть близкими к 100°C . В этом случае произойдет существенное увеличение сил осевой прессовки обмоток, в результате увеличатся и силы, действующие при коротких замыканиях на прессующую конструкцию. Все это следует учитывать в расчетах по оценке стойкости трансформаторов к токам коротких замыканий. В зависимости от минимальной температуры охлаждения активной части процесс нагревания до максимальной температуры будет сопровождаться увеличением усилий в элементах прессовки по графикам, представленным линиями $A_2A_1A_7$, или $A_3A_1A_7$, или $A_5A_6A_7$ (рис. 2). Изменение силы трения между ярмовыми балками и ярмом будут представлять линии $B_2B_1B_7$, или $B_3B_1B_7$, или $B_5B_6B_7$, усилия в элементах крепления ярмовых балок – точки C_1 или C_2 до начала движения ярмовых балок относительно яра, отрезки C_1C_3 или



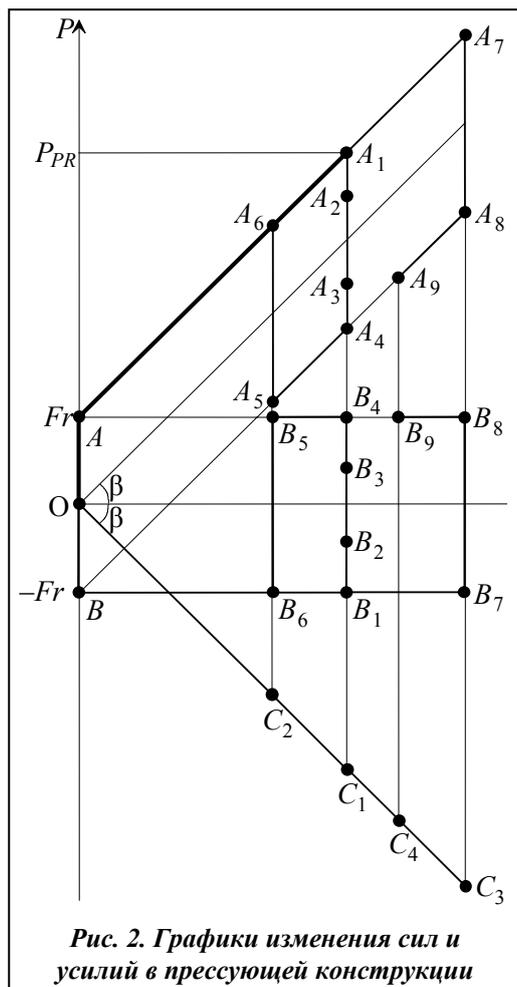


Рис. 2. Графики изменения сил и усилий в прессующей конструкции

C_2C_3 при их движении.

При охлаждении активной части от максимальной температуры в эксплуатации до комнатной температуры, что может иметь место, например, в случае вывода трансформатора из работы, процессам изменения усилия в элементах прессовки на рис. 2 будет соответствовать линия $A_7A_8A_9$, силе трения между яровыми балками и яром – $B_7B_8B_9$, усилию в элементах крепления яровых балок – точка C_3 и отрезок C_3C_4 .

Аналогичным образом будут изменяться усилия в элементах активной части при изменении влагосодержания изоляционных материалов в обмотках.

Согласно представленным результатам процессы, происходящие в активной части при изменении температуры элементов или влагосодержания изоляционных материалов обмоток, в самом общем случае можно разделить на этапы двух видов. При первом изменении усилий в элементах происходит без движения яровых балок относительно яра (вертикальные отрезки на графиках изменения усилий в элементах прессовки рис. 2). Для второго вида характерно такое движение (наклонные отрезки на тех же графиках, рис. 2). В первом случае усилие в элементах крепления яровых балок не изменяется. Равновесие яровых балок при изменении усилий в обмотках обеспечивается за счет изменения силы трения. Во втором случае сила трения между яровыми балками и яром равна максимальной силе трения покоя и постоянна по направлению. Равновесие сил при движении яровых балок относительно яра поддерживается за счет изменения усилия в элементах их крепления.

Таким образом, задача сводится к определению усилий в элементах активной части для этапов этих двух видов. Полученные результаты позволят рассчитывать усилия в элементах активной части при любых изменениях их температуры и влагосодержания изоляционных материалов.

1. Определение усилий в элементах активной части при изменении их температуры и влагосодержания изоляционных материалов.

Для определения усилий запишем условия равновесия яровых балок, прессующего кольца и верхней части магнитной системы с обмотками в проекции на вертикальную ось, используя расчетные схемы, представленные на рис. 3, 4. В результате будем иметь

$$N_r + F - N_y = 0; \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^N N_i - N_r = 0; \tag{2}$$

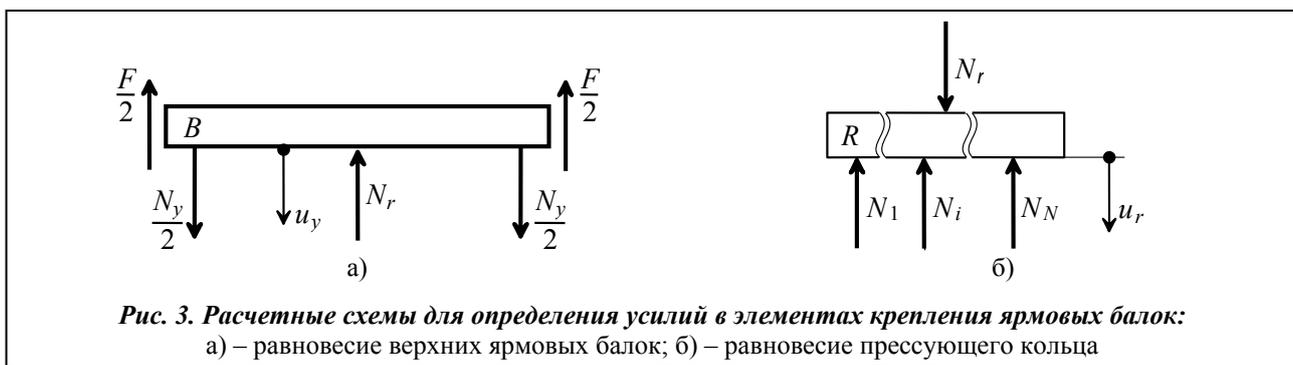


Рис. 3. Расчетные схемы для определения усилий в элементах крепления яровых балок: а) – равновесие верхних яровых балок; б) – равновесие прессующего кольца

$$\sum_{i=1}^N N_i - N_m = 0, \tag{3}$$

где F – сила трения между ярмовыми балками и ярмом; N_r – усилие в элементах прессовки; N_y – усилие в элементах крепления ярмовых балок; N_m – усилие в магнитной системе; N_i – усилие в i -й обмотке (положительное при сжатии). Все усилия берутся для одного стержня магнитной системы, на котором установлены обмотки.

Мы имеем три уравнения равновесия, содержащие $3 + N$ неизвестных усилий. Задача N раз статически неопределимая. Для раскрытия статической неопределимости выразим усилия в элементах активной части через перемещения ярмовых балок u_y , прессующего кольца u_r и верхнего яра магнитной системы u_m . С учетом изменения температуры элементов и влагосодержания изоляционных материалов обмоток придем к таким выражениям для усилий:

$$N_r = N_{0r} - c_r(u_r - u_y); \tag{4}$$

$$N_y = N_{0y} - c_y(u_y - u_m); \tag{5}$$

$$N_m = N_{0m} - c_m(u_m + k_m t_m); \tag{6}$$

$$N_i = N_{0i} + c_i(u_r + kt_i \cdot t_i + kw_i \cdot w_i), \tag{7}$$

где N_{0r} , N_{0y} , N_{0m} , N_{0i} – усилия в элементах прессовки, элементах крепления ярмовых балок, магнитной системе и обмотке в начальный момент этапа – начальные усилия (на один стержень магнитной системы); c_r , c_y , c_m , c_i – коэффициенты жесткости элементов прессовки, элементов крепления ярмовых балок, магнитной системы, обмотки (на один стержень магнитной системы); k_m , t_m – коэффициент теплового линейного расширения и изменение средней температуры магнитной системы; 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.

Условия равновесия (1)–(3) выполняются и в начальный момент этапа, следовательно, они будут справедливы и для начальных усилий в элементах активной части

$$N_{0r} + F_0 - N_{0y} = 0; \quad \sum_{i=1}^N N_{0i} - N_{0r} = 0; \quad \sum_{i=1}^N N_{0i} - N_{0m} = 0, \tag{8}$$

где F_0 – сила трения между ярмовыми балками и ярмом в начальный момент этапа.

Из представленных выражений видно, что решение поставленной задачи сводится к определению перемещений u_y , u_r , u_m , для чего имеется три уравнения равновесия (1)–(3).

Рассмотрим этапы первого вида, протекающие без движения ярмовых балок относительно яра. В этом случае будет выполняться условие

$$u_y = u_m. \tag{9}$$

Учитывая это условие, из выражения (5) получим

$$N_y = N_{0y}. \tag{10}$$

После подстановки выражений для усилий (4), (6), (7) в уравнения равновесия (2), (3), принимая во внимание соотношения (8), будем иметь

$$u_r = (c_r u_m - D_w) \cdot c^{-1}; \tag{11}$$

$$u_r = -(c_r D_w c^{-1} + c_m k_m t_m) \cdot (c_m + c_r u_w c^{-1})^{-1}, \tag{12}$$

где

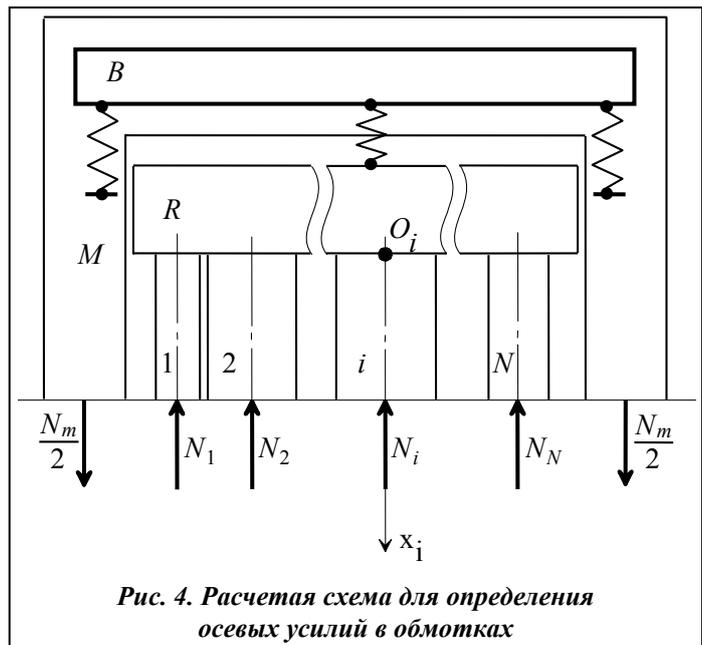


Рис. 4. Расчетная схема для определения осевых усилий в обмотках

$$c = c_r + c_w; \quad c_w = \sum_{i=1}^N c_i; \quad D_w = \sum_{i=1}^N c_i (kt_i \cdot t_i + kw_i \cdot w_i). \quad (13)$$

Полученные результаты (9)–(12) справедливы при отсутствии движения ярмовых балок относительно ярма. Это движение начнется в тот момент, когда сила трения между ярмовыми балками и ярмом станет равна максимальной силе трения покоя. При охлаждении активной части и высыхании изоляционных материалов (уменьшение усилий в обмотках) эта сила будет направлена вверх (против перемещения ярмовых балок относительно ярма) – $F = Fr$. При нагревании активной части и увлажнении изоляционных материалов (увеличение усилий в обмотках) сила трения будет направлена вниз – $F = -Fr$. С учетом этого из уравнения равновесия ярмовых балок (1) получим условия для определения нижних и верхних граничных изменений температур и влагосодержаний, при которых начинается движение ярмовых балок относительно ярма вниз и вверх соответственно. В результате получим такое уравнение:

$$D_w - c_w k_m t_m = (F_0 \pm Fr) [1 + c_r c_w c_m^{-1} c^{-1}] \cdot (1 + c_w c_r^{-1}), \quad (14)$$

где знак плюс берется при нагревании элементов активной части и увлажнении изоляционных материалов для определения верхних граничных изменений температур и влагосодержаний, знак минус – при охлаждении элементов активной части и высыхании изоляционных материалов для определения нижних граничных изменений температур и влагосодержаний.

Если происходят изменения только температуры или только влагосодержания одинаковые для всех элементов из выражения (14) получим такие условия для определения верхних (знак плюс) и нижних (знак минус) граничных изменений температуры и влагосодержания:

$$\{t_B, t_b\} = (F_0 \pm Fr) \frac{c}{c_r (Dt_w - c_w k_m)} (1 + c_r c_w c_m^{-1} c^{-1}); \quad (15)$$

$$\{w_B, w_b\} = (F_0 \pm Fr) \frac{c}{c_r D w_w} (1 + c_r c_w c_m^{-1} c^{-1}), \quad (16)$$

где

$$Dt_w = \sum_{i=1}^N c_i kt_i; \quad D w_w = \sum_{i=1}^N c_i kw_i, \quad (17)$$

t_B, t_b – верхнее и нижнее граничные изменения температуры; w_B, w_b – верхнее и нижнее граничные изменения влагосодержания.

Изменения температуры элементов активной части и влагосодержания, изоляционных материалов, при которых сила трения между ярмовыми балками и ярмом изменяется от максимального значения одного знака до максимального значения противоположного знака, будем называть полными и обозначать символами t_f и w_f соответственно.

Для этапов второго типа, при которых ярмовые балки движутся относительно ярма, из условий равновесия (1)–(3) после подстановки в них выражений для усилий (4)–(7) получим такие выражения для перемещений:

$$u_y = \pm [c_y (1 + c_w c_r^{-1}) u_m - D_w] \cdot (c_y + c_w + c_y c_w c_r^{-1})^{-1}; \quad (18)$$

$$u_r = [c_r u_m - c_y (1 + c_r c_y^{-1}) D_w] \cdot (c_r + c_w + c_r c_w c_y^{-1})^{-1}; \quad (19)$$

$$u_m = - [c_r D_w - c_m k_m t_m (c_r + c_w + c_r c_w c_y^{-1})] \cdot [c_r c_w + c_m (c_r + c_w + c_r c_w c_y^{-1})]^{-1}, \quad (20)$$

где знак плюс соответствует движению ярмовых балок вверх вследствие нагревания элементов активной части и увлажнения изоляционных материалов, знак минус – движению ярмовых балок вниз при охлаждении элементов активной части и высыхании изоляционных материалов.

Полученные результаты позволяют определять осевые усилия в элементах активной части при всех возможных процессах изменения их температур и влагосодержаний изоляционных материалов. Для этого каждый процесс следует разбить на этапы первого и второго вида. В качестве началь-

ных усилий в элементах на каждом последующем этапе принимаются усилия, соответствующие конечному моменту предыдущего этапа.

На основе полученных результатов были определены усилия в обмотках ряда трансформаторов серии 110 kV. 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 средней температуре всех элементов 368 К; N_{ni} – усилия в обмотках при средней температуре всех элементов 293 К; N_{tri} – усилия в обмотках во время транспортирования при средней температуре всех элементов 248 К; N_{wi} – усилия в обмотках после увеличения на 1,0% влагосодержания их изоляционных материалов и средней температуре всех элементов 323 К; P_{tri} – силы прессовки обмоток, необходимые для предотвращения их смещения во время транспортирования при ускорении, равном 3g. Для расчета коэффициентов жесткости и линейного расширения элементов активной части при изменении температуры использовались выражения работы [3]. Аналогично определялись коэффициенты линейного расширения обмоток, вызванные изменением влагосодержания изоляционных материалов. В первом приближении считалось, что изменение влагосодержания изоляционных материалов на 1% вызывает их деформацию, равную также 1%.

Расчетная схема для определения осевых усилий в обмотках

Трансформатор	Обмотка	$c_i \cdot 10^{-7}$ Nm ⁻¹	$kt_i \cdot 10^5$ мК ⁻¹	$kw_i \cdot 10^3$ м	M, kg	Fr, kN	N_{0i} , kN	N_i , kN	N_{ni} , kN	N_{tri} , kN	P_{tri} , kN	N_{wi} , kN
ТРДН-40000/110	НН	6,170	3,667	4,598	1290	46,3	128,6	159,2 +24%	100,3 -22%	67,31 -48%	56,88	287,5
	ВН	5,555	4,031	6,850	1580		155,5	192,2 +24%	124,0 -20%	85,15 -45%	69,50	423,7
	РО	7,091	2,678	3540	420		49,04	52,7 +7,5%	37,56 -23%	31,20 -36%	18,31	156,7
ТРДН-63000/110	НН	5,272	4,361	6,441	1620	48,3	134,4	169,6 +26%	105,4 -22%	68,86 -49%	71,42	369,0
	ВН	6,904	4,293	5,898	2230		155,6	199,5 +28%	119,1 -24%	73,30 -53%	98,41	425,4
	РО	7,120	3,056	3,100	520		58,00	63,66 +10%	46,77 -19%	39,17 -33%	22,82	137,0
ТРДН-80000/110	НН	5,994	4,677	6,194	2320	63,2	147,8	188,8 +28%	110,5 -25%	66,94 -55%	102,5	397,5
	ВН	6,327	4,661	6,194	2800		163,2	205,9 +26%	124,2 -24%	78,55 -52%	123,7	426,7
	РО	5,730	3,934	5,210	640		57,10	77,08 +35%	34,27 -40%	11,67 -80%	28,11	239,4

Как видим, при повышении температуры элементов активной части во время эксплуатации (до 95 °С) усилия сжатия в обмотках увеличиваются в среднем (по всем трансформаторам) на 23% по отношению к усилиям, возникшим после запрессовки (при температуре 50 °С). Это положительно сказывается на стойкости обмоток к действию радиальных сжимающих сил короткого замыкания, но приводит к повышению осевых усилий в них, а также сил, действующих на прессующую конструкцию. Уменьшение температуры элементов активной части до 20 °С сопровождается уменьшением осевых усилий сжатия обмоток на 24%. Снижение температуры при транспортировании до -25 °С приводит к уменьшению усилий сжатия в обмотках в среднем на 50%. Для трансформаторов ТРДН-63000/110 и ТРДН-80000/110 остаточные осевые усилия сжатия обмоток при температуре -25 °С оказались меньшими, чем силы прессовки, необходимые для предотвращения их смещения при ускорении 3g во время транспортирования. Последнее недопустимо, 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.

ния. Увеличение влагосодержания изоляции обмоток на 1,0% привело к сильному увеличению усилий сжатия (для рассмотренных трансформаторов на сотни процентов). Следовательно, активную часть трансформатора нельзя долго оставлять на открытом воздухе, так как увлажнение изоляции обмоток может привести к разрушению прессующей конструкции.

Обследование трансформаторов при капитальных ремонтах показало, что средний уровень остаточных сил прессовки составляет примерно 55%. Согласно представленным выше результатам такое уменьшение сил осевой прессовки обмоток может быть обусловлено разностью температур активной части при запрессовке обмоток и при обследовании во время капитальных ремонтов. Также из таблицы видно, что при нагревании активной части от 20 °С до температур, имеющих место в эксплуатации, осевые усилия в обмотках увеличиваются в среднем примерно на 45%. Следовательно, при эксплуатации трансформаторов силы прессовки обмоток фактически равны расчетным.

Выводы

Получены выражения для расчета осевых усилий в элементах активной части при изменении их температуры и влагосодержания изоляционных материалов. На примере ряда трансформаторов серии 110 кВ изучено влияние указанных факторов на осевые усилия в обмотках. Согласно полученным результатам при рассмотренной прессующей конструкции температура элементов активной части и влагосодержание изоляционных материалов значительно влияют на осевые усилия в обмотках. Это следует учитывать при практических расчетах трансформаторов для предотвращения смещения обмоток при транспортировании и обеспечения стойкости трансформаторов к токам коротких замыканий. Определение остаточных сил прессовки необходимо производить с учетом температуры элементов активной части во время запрессовки обмоток и при обследовании.

Литература

1. Лазарев, И. В. Осевые усилия в обмотках силовых трансформаторов при запрессовке, изменении температуры и влагосодержания в случае применения блочной сборки / И. В. Лазарев // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 97–105.
2. Лазарев, В. И. О причине уменьшения сил осевой прессовки обмоток трансформаторов при коротких замыканиях / В. И. Лазарев, И. В. Лазарев // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 18–22.
3. Лазарев, В. И. Определение усилий в элементах механической системы однофазного одностержневого шунтирующего реактора с боковыми ярмами при изменении температуры, подъеме активной части и транспортировании / В. И. Лазарев, И. В. Зубкова // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2005. – № 3(12). – С. 124–132.

Поступила в редакцию 22.08.14