

- № 1. – С. 96–107.
5. Васильев, А. Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств при действии ударных нагрузок / А. Ю. Васильев // Вестн. НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – 2005. – № 47. – С. 42–50.
  6. Общие подходы к оценке и обеспечению защищенности бронекорпусов легких по массе машин / Ю. М. Бусьяк, Н. Н. Ткачук, А. Ю. Васильев и др. // Вестн. НТУ «ХПИ». Тем. вып. Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 154–163.
  7. Дорофеев, А. Н. Авиационные боеприпасы / А. Н. Дорофеев, А. П. Морозов, Р. С. Саркисян. – М.: Воен.-воздуш. инж. акад. им. Н. Е. Жуковского, 1978. – 446 с.
  8. Ионов, В. Н. Прочность боеприпаса при взаимодействии с преградой / В. Н. Ионов. – М.: Машиностроение, 1979. – 423 с.
  9. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 1. Постановка задачи. 2. Кинематическая модель контакта гладких тел / Н. Н. Ткачук, И. Я. Мовшович, Н. А. Ткачук и др. // Кузнеч.-штампов. пр-во. Обработка материалов давлением – 2014. – № 3. – С. 3–10.
  10. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
  11. Демкин, Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
  12. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
  13. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // J. Reine Angew. Math. – 1881. – Vol. 92. – S. 156–171.
  14. Simo, J. C. A perturbed Lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems // J. C. Simo, P. Wriggers, R. L. Taylor // Computer Methods in Appl. Mech. and Eng. – 1985. – Vol. 50. – P. 163–180.
  15. Галин, Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
  16. Александров, В. М. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости / В. М. Александров, М. И. Чебаков // – М.: Физматлит, 2004. – 304 с.
  17. www.kalkersoftware.org.

Поступила в редакцию 21.01.15

<sup>1</sup> И. В. Лазарев

<sup>2</sup> В. Г. Шевченко, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт трансформаторостроения», г. Запорожье, e-mail: oemi@vit.zp.ua

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, e-mail: kafedra\_mex@zntu.edu.ua

**Ключові слова:** електропружність, полого сферична оболонка, нестационарні коливання, інтегральне перетворення Лапласа.

### Введение

Электродинамическая стойкость трансформаторов в значительной мере зависит от сил прессовки обмоток. В трансформаторах с активной частью наиболее распространенной конструкции, в которой ярмовые балки используются для прессовки как обмоток, так и магнитопровода существенным фактором, влияющим на силы прессовки являются силы сухого трения между ярмовыми балками и ярмом. В работе [1] рассмотрен процесс изменения усилий в элементах крепления ярмо-

УДК 621.314.21.045.001.5

## ОСЕВЫЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОСЛЕ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

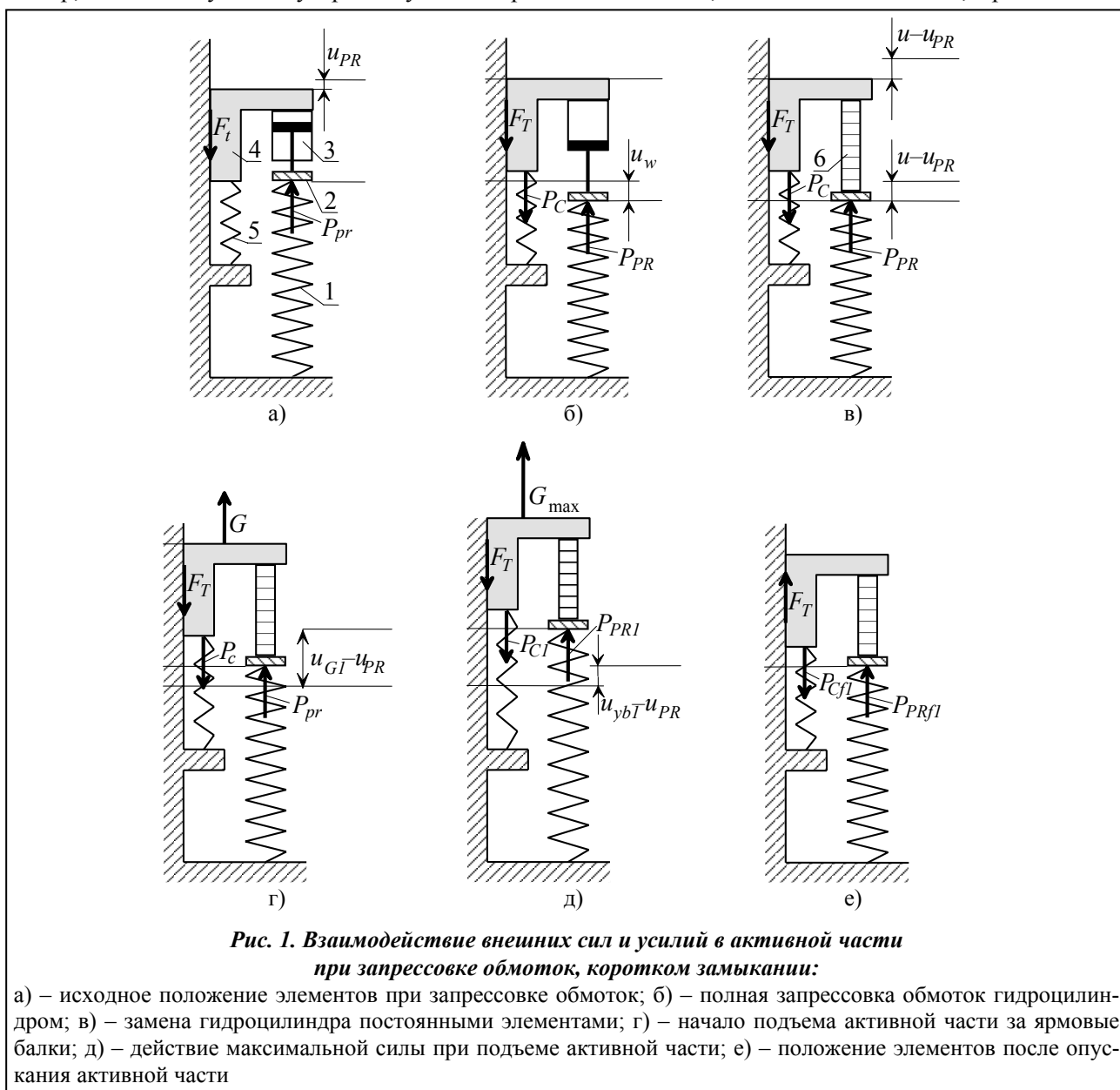
*Розглянуто трансформатори стрижневого типу, в яких пресування обмоток і торцевих ярем магнітної системи здійснюється за допомогою одних і тих же ярмових балок. З урахуванням сил тертя між ярмовими балками і ярмом визначено зусилля в елементах активної частини після коротких замикань. На числових прикладах вивчено вплив на зусилля в обмотках осевих сил короткого замикання.*

вых балок и в обмотках, который происходит в таких трансформаторах при однократном коротком замыкании. Влияние многократных коротких замыканий, которые нередко имеет место в эксплуатации, на усилия в обмотках и элементах крепления ярмовых балок еще не рассматривалось. Это обусловило цель данного исследования: определение усилий в элементах крепления ярмовых балок и обмотках трансформаторов с активной частью традиционной конструкции после многократных коротких замыканий с последующей подпрессовкой обмоток.

Будем рассматривать наиболее распространенный в трансформаторостроении случай, когда сила прессовки обмоток превышает максимальную силу трения покоя между ярмом и ярмовыми балками  $|P_{PR}| > |F_T|$ .

### 1. Расчет усилий в элементах активной части в процессе запрессовки обмоток

С учетом рассмотренного в работе [1] влияния сил различной природы рассмотрим процесс запрессовки обмоток трансформатора с помощью ярмовых балок. Для изучения этого процесса используем расчетную схему, показанную на рис. 1, где: 1 – безынерционная пружина, моделирующая обмотки трансформатора; 2 – жесткий элемент, эквивалентный прессующим кольцам; 3 – гидроцилиндр, соответствующий устройству для запрессовки обмоток; 4 – жесткий элемент, представляю-



**Рис. 1. Взаимодействие внешних сил и усилий в активной части при запрессовке обмоток, коротком замыкании:**

а) – исходное положение элементов при запрессовке обмоток; б) – полная запрессовка обмоток гидроцилиндром; в) – замена гидроцилиндра постоянными элементами; г) – начало подъема активной части за ярмовые балки; д) – действие максимальной силы при подъеме активной части; е) – положение элементов после опускания активной части

щий ярмовые балки (верхние); 5 – безынерционная пружина, соответствующая элементам крепления ярмовых балок (прессующие пластины, шпильки, полубандажи и т. п.).

Здесь и в дальнейшем будем рассматривать один стержень магнитной системы трансформатора с расположенными на нем обмотками, запрессованными общим прессующим кольцом (общими верхним и нижним прессующими кольцами). Следовательно, 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 будем обозначать символом  $P_{pr}$ . Пока сила прессовки  $P_{pr}$  не превосходит по абсолютной величине максимальную силу трения покоя между ярмом (верхним) и ярмовыми балками  $F_T$ , они будут оставаться неподвижными. При этом элементы крепления ярмовых балок не деформируются и усилие (дополнительное) в них не возникает:  $P_c = 0$ . Сила прессовки  $P_{pr}$  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 уравнению (1) сила трения покоя между ярмом и ярмовыми балками по модулю равна силе прессовки  $F_T = P_{pr}$  ( $|P_{pr}| \leq |F_T|$ ).

В случае, когда заданная сила прессовки обмоток  $P_{PR}$  по абсолютной величине больше максимальной силы трения покоя между ярмом и ярмовыми балками ( $|P_{PR}| > |F_T|$ ), в процессе запрессовки обмоток сила прессовки  $P_{pr}$  превзойдет по абсолютной величине максимальную силу трения покоя между ярмом и ярмовыми балками  $F_T$ . В момент, когда сила прессовки  $P_{pr}$  превысит по абсолютной величине максимальную силу трения покоя между ярмом и ярмовыми балками  $F_T$ , последние 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  $F_T = -F_T$  ( $|P_{pr}| > |F_T|$ ) и направлена вниз (против движения).

В этом случае условие равновесия ярмовых балок примет вид

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

Усилие в элементах крепления ярмовых балок  $P_c$  пропорционально их вертикальному перемещению  $u$  (удалению от положения до запрессовки обмоток), но направлено в противоположную сторону, то есть определяется выражением

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

где  $c_y$  – коэффициент жесткости элементов крепления ярмовых балок.

С учетом выражений (2), (3) получим такую зависимость между силой прессовки и вертикальным перемещением ярмовых балок:

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

После окончательной запрессовки обмоток максимальная сила, действующая на ярмовые балки,  $P_{pr} = P_{PR}$ , будет уравниваться окончательной силой трения  $F_{yf}$ , равной по абсолютной величине максимальной силе трения покоя  $F_T$

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

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

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

Условие равновесия ярмовых балок после окончательной запрессовки обмоток имеет вид

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

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 заданная сила прессовки обмоток  $P_{PR}$ , по модулю равная

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

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 прессовки 6 (прессующими винтами, специальными брусками и т. п., рис. 1, в). Эта замена не приводит к изменению положения или деформации элементов активной части, а значит, усилия в них останутся прежними, такими, как в момент полной запрессовки обмоток. Следовательно, соответствующее условие равновесия ярмовых балок (7) сохранит свою силу.

Таким образом, выражения (8), (5) служат для определения окончательных сил в элементах активной части трансформатора после запрессовки обмоток

## 2. Влияние короткого замыкания

При коротком замыкании на ярмовые балки (верхние) со стороны обмоток будет действовать изменяющаяся во времени сила  $P$ . В начальный момент короткого замыкания сила  $P$  совпадает с силой прессовки обмоток (начальной). В процессе короткого замыкания она увеличивается до некоторого максимального значения, а затем уменьшается до силы прессовки обмоток (остаточной). То есть можно считать, что к ярмовым балкам прикладывается дополнительная сила  $G$ , которая увеличивается от нуля до некоторого максимального значения  $G_{\max}$ , а затем уменьшается до нуля.

В случае, когда заданная сила прессовки обмоток по абсолютной величине больше модуля максимальной силы трения покоя между ярмом и ярмовыми балками ( $|P_{PR}| > |F_T|$ ), при коротком замыкании ярмовые балки сразу начнут двигаться вверх относительно ярма, что приведет к распрессовке обмоток и увеличению усилия в элементах крепления ярмовых балок. Условие равновесия ярмовых балок (рис. 1, г) имеет вид

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

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

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

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

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

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

Наибольшее вертикальное перемещение ярмовых балок при коротком замыкании части  $u_{G1}$  (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 коротком замыкании;  $P_{C1}$  – наибольшая сила в элементах крепления ярмовых балок при коротком замыкании.

Для определения входящих в уравнение (16) сил используем выражения (13), (14), подставив в них  $u = u_{G1}$ . С учетом уравнения (7) для минимальной силы осевой прессовки обмоток, максимального усилия в элементах крепления ярмовых балок и их наибольшего вертикального перемещения при коротком замыкании и в этом случае ( $|P_{PR}| > |F_T|$ ) получим следующие выражения:

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

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

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

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

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

По окончании короткого замыкания сила  $G$  будет уменьшаться от максимального значения до нуля. Если разность между абсолютными величинами максимального усилия в элементах крепления ярмовых балок и минимальной силой прессовки не превосходит модуля максимальной силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом ( $|P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$ ), что согласно уравнению (16) имеет место при условии  $|G_{\max}| \leq 2|F_T|$ , то уменьшение силы  $G$  до нуля не приведет к движению ярмовых балок относительно ярма. Они останутся в крайнем верхнем положении. Следовательно, и здесь окончательная сила прессовки обмоток  $P_{PRf1}$  будет равна минимальной силе прессовки обмоток при коротком замыкании  $P_{PRf1} = P_{PR1}$ , меньшей по модулю, чем исходная (заданная) сила прессовки обмоток  $|P_{PR1}| < |P_{PR}|$ . Окончательное усилие в элементах крепления ярмовых балок  $P_{Cf1}$  останется равным максимальному усилию в элементах крепления ярмовых балок при коротком замыкании  $P_{Cf1} = P_{C1}$ . С учетом выражения (20) для определения окончательной силы прессовки обмоток и окончательного усилия в элементах крепления ярмовых балок после короткого замыкания в рассматриваемом случае ( $|P_{PR}| > |F_T|$ ;  $|P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$ ) получим такие формулы:

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

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

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

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

Если выполняется условие  $|F_T| < |G_{\max}| \leq 2|F_T|$ , сила трения между ярмовыми балками и ярмом, направленная вниз, вначале будет уменьшаться от максимального значения до нуля. Затем она изменит свое направление на противоположное и начнет увеличиваться по абсолютной величине до значения  $|G_{\max}| - |F_T|$ . Таким образом, окончательная сила трения между ярмовыми балками и ярмом по-прежнему будет определяться выражением (23).

При разности между абсолютными величинами максимального усилия в элементах крепления ярмовых балок и минимальной силой прессовки обмоток большей, чем модуль максимальной силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом, ( $|P_{C1}| - |P_{PR1}| > |F_T|$ ), чему согласно уравнению (16) соответствует условие  $2|F_T| < |G_{\max}|$ , уменьшение силы  $G$  до нуля будет сопровождаться движением ярмовых балок вниз относительно ярма. Окончательное перемещение ярмовых балок относительно их начального положения (до запрессовки обмоток)  $u_{yb1}$  (рис. 1, е) примет значение, при котором будет выполняться условие равновесия

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

Для определения сил, входящих в уравнение (24), используем выражения (13), (14), подставив в них  $u = u_{yb1}$ . С учетом уравнений (7), (24) в рассматриваемом случае ( $|P_{PR}| > |F_T|$ ;  $|P_{C1}| - |P_{PR1}| > |F_T|$ ) для определения окончательной силы прессовки обмоток, окончательного усилия в элементах крепления ярмовых балок и окончательного их перемещения после короткого замыкания имеем формулы

$$P_{PRf1} = P_{PR} - c_w \cdot u_{yb1}; \quad (25)$$

$$P_{Cf1} = P_C - c_y \cdot u_{yb1}; \quad (26)$$

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

в которых

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

С учетом выражения (28) окончательно получим

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

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

Из выражения (29) видно, что окончательная сила прессовки обмоток  $P_{PR\Gamma}$  и в этом случае по модулю меньше начальной (заданной)  $|P_{PR\Gamma}| < |P_{PR}|$ . Окончательное усилие в элементах крепления ярмовых балок  $P_{C\Gamma}$  по абсолютной величине будет больше, чем возникшее после запрессовки обмоток  $|P_{C\Gamma}| > |P_C|$  (30).

После короткого замыкания сила трения между ярмовыми балками и ярмом будет меняться следующим образом. При уменьшении модуля силы  $G$  от наибольшего значения  $|G_{\max}|$  до величины  $|G_{\max}| - |2F_T|$  вначале она, оставаясь направленной вниз, будет уменьшаться по абсолютной величине от наибольшего значения, равного  $|F_T|$ , до нуля. После эта сила изменит направление на противоположное и по абсолютной величине будет увеличиваться от нуля до наибольшего значения  $|F_T|$ . При дальнейшем уменьшении силы  $G$  начнется движение ярмовых балок вниз относительно яра. Сила трения между ярмом и ярмовыми балками будет направлена вверх (против движения) и по модулю равна максимальной силе трения покоя  $|F_T|$ . Она сохранит это направление и абсолютную величину после остановки ярмовых балок. Таким образом, окончательная сила трения между ярмовыми балками и ярмом будет определяться выражением

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

При этом распрессовка обмоток во всех рассмотренных случаях (21), (29) тем больше, чем больше их жесткость и меньше жесткость прессующей конструкции. Увеличение абсолютной величины 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 абсолютной величины усилия в элементах крепления ярмовых балок обусловлены тем, что после короткого замыкания сила трения между ярмом и ярмовыми балками не дает последним вернуться в их положение после начальной запрессовки обмоток.

Согласно выражению (13) полная распрессовка обмоток при коротком замыкании произойдет, если наибольшее вертикальное перемещение ярмовых балок  $u_{G1}$  достигнет или превзойдет следующее 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  $G_{10}$ , при котором во время короткого замыкания произойдет полная распрессовка обмоток, определяется с помощью выражения (7) после подстановки в него наибольшего вертикального перемещения из формулы (32) и соответственно будет

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

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

Полученные результаты говорят о том, что после короткого замыкания в случае  $|G_{10}| \leq |2F_T| \leftrightarrow |P_{C1}| - |P_{PR1}| \leq |F_T|$  обмотки так и останутся полностью распрессованными. При выполнении условий  $|2F_T| \leq |G_{10}| \leftrightarrow |F_T| \leq |P_{C1}| - |P_{PR1}|$  после короткого замыкания ярмовые балки переместятся вниз по отношению к яру под действием усилий в элементах их крепления, вследствие чего произойдет подпрессовка обмоток до силы  $P_{PR\Gamma}$ , определяемой выражением (29) для случая  $|F_T| < |P_{PR}|$ .

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

### 3. Расчет сил, необходимых для подпрессовки обмоток трансформатора

После короткого замыкания может быть произведена подпрессовка обмоток. Из формул (21), (29) видно, насколько распрессовались обмотки в каждом случае при коротком замыкании. На основе этих выражений можно показать, что изменения силы прессовки обмоток  $\Delta P_{PR}$  после короткого замыкания во всех случаях по абсолютной величине меньше изменений по модулю силы трения между

ярмовыми балками и ярмом  $\Delta F_t$ . Доказательства представлены ниже. В них и в дальнейшем приняты такие обозначения:

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

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

Изменение силы трения

Доказательство

$$\begin{aligned} |\Delta F_t| = |G_{\max}| & \left\{ \begin{array}{l} 0 < K_w < 1 \\ c_y > 0, c_w > 0 \end{array} \right\} \rightarrow |\Delta P_{PR1}| = K_w |G_{\max}| < |G_{\max}| \\ |\Delta F_t| = |2F_T| & \left\{ \begin{array}{l} 0 < K_w < 1 \\ c_y > 0, c_w > 0 \end{array} \right\} \rightarrow |\Delta P_{PR1}| = K_w |2F_T| < |2F_T|. \end{aligned}$$

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

$$F_{tlf} = -F_T + \Delta F_t - \Delta P_{PR1}. \tag{36}$$

Поскольку  $|\Delta P_{PR1}| < |\Delta F_t| < |2F_T|$ , то при изменении силы трения в процессе подпрессовки обмоток на величину  $\Delta P_{PR1}$  ярмовые балки перемещаться не будут. Следовательно, в результате подпрессовки обмоток усилие в элементах крепления ярмовых балок не изменится. Окончательная сила прессовки обмоток будет  $P_{PRfl} = P_{PR}$ . Окончательные выражения для определения сил в элементах активной части после подпрессовки обмоток приведены ниже

Условия при запрессовке обмоток, коротком замыкании

Окончательные силы в элементах активной части трансформатора

$$\begin{aligned} |G_{\max}| &\leq |2F_T| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &\leq |F_T| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{PRlf} &= P_{PR} \\ P_{C1f} &= P_C - K_y G_{\max} \\ F_{tlf} &= K_y (G_{\max} - F_T) - K_w F_T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |2F_T| &< |G_{\max}| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &> |F_T| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{PRlf} &= P_{PR} \\ P_{C1f} &= P_C - K_y 2F_T \\ F_{tlf} &= (K_y - K_w) F_T. \end{aligned}$$

#### 4. Расчет усилий в элементах активной части при повторных коротких замыканиях после подпрессовки обмоток.

Путем обобщения полученных результатов были определены силы, возникающие в элементах активной части после  $i$ -го короткого замыкания для случая, когда все предыдущие короткие замыкания сопровождались подпрессовкой обмоток. Результаты приведены ниже.

Условия при запрессовке обмоток, коротком замыкании

Окончательные перемещения и силы в элементах активной части трансформатора

$$\begin{aligned} |G_{\max}| &\leq |2F_T| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &\leq |F_T| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{Gi} &= u_{Gi-1} + K_w^{i-1} u_G \\ u_{PR} &= (P_{PR} - F_T) c_y^{-1} \\ u_G &= G_{\max} (c_y + c_w)^{-1} \\ P_{PRfi} &= P_{PR} - K_w^{i-1} c_w u_G \\ P_{Cfi} &= P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_G \\ P_C &= P_{PR} - F_T \\ F_{tli} &= G_{\max} - F_T. \end{aligned}$$

Условия при запрессовке обмоток, коротком замыкании

$$\begin{aligned} |2F_T| &< |G_{\max}| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &> |F_T| \end{aligned}$$

Окончательные перемещения и силы в элементах активной части трансформатора

$$\begin{aligned} u_{ybi} &= u_{ybi-1} + K_w^{i-1} u_{yb} \\ u_{PR} &= (P_{PR} - F_T) c_y^{-1} \\ u_{yb} &= 2F_T (c_y + c_w)^{-1} \\ P_{PRfi} &= P_{PR} - K_w^{i-1} c_w u_{yb} \\ P_{Cfi} &= P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_{yb} \\ P_C &= P_{PR} - F_T \\ F_{fi} &= F_T. \end{aligned}$$

Ниже представлены выражения для определения сил в элементах активной части, возникших в рассматриваемом случае после подпрессовки обмоток.

Условия при запрессовке обмоток, коротком замыкании

$$\begin{aligned} |G_{\max}| &\leq |2F_T| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &\leq |F_T| \end{aligned}$$

Окончательные перемещения и силы в элементах активной части трансформатора

$$\begin{aligned} P_{PRif} &= P_{PR} \\ P_{Cfi} &= P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_G \\ P_C &= P_{PR} - F_T \\ u_G &= G_{\max} (c_y + c_w)^{-1} \\ F_{tif} &= G_{\max} - F_T - K_w^{i-1} c_w u_G \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |2F_T| &< |G_{\max}| \\ |P_{C1}| - |P_{PR1}| &> |F_T| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{PRif} &= P_{PR} \\ P_{Cfi} &= P_{Cfi-1} - K_w^{i-1} c_y u_{yb} \\ P_C &= P_{PR} - F_T \\ u_{yb} &= 2F_T (c_y + c_w)^{-1} \\ F_{tif} &= F_T - K_w^{i-1} c_w u_{yb}. \end{aligned}$$

В целом полученные результаты подтверждают выводы работы [1] о том, что путем подпрессовки обмоток после повторных коротких замыканий можно практически исключить распрессовку обмоток.

При определении  $G_{\max}$  будем считать, что максимальная сила, действующая со стороны обмоток на ярмовые балки при коротком замыкании,  $P_{tyb}$  определяется по результатам расчета обмоток на электродинамическую стойкость, а сила прессовки обмоток в начальный момент короткого замыкания равна заданной  $P_{PR}$ .

В случае, когда абсолютная величина заданной силы прессовки обмоток больше модуля максимальной силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом ( $P_{PR} > F_T$ ), при действии силы  $P$  ( $|P| > |P_{PR}|$ ) ярмовые балки сразу начнут двигаться вверх относительно ярма. Условие равновесия ярмовых балок в проекции на направленную вверх вертикальную ось будет иметь вид

$$P - F_T + P_c = 0 \quad (|P| > |F_T|), \quad (37)$$

где усилие в элементах крепления ярмовых балок  $P_c$  определяется выражением (14), с учетом которого получим выражение

$$P(u) = F_T + c_y u \quad (|P| > |F_T|; |P| > |P_{PR}|). \quad (38)$$

Действующая на ярмовые балки при коротком замыкании дополнительная сила определяется как

$$G = P - P_{pr}, \quad (39)$$

для составляющих которого справедливы формулы (39) и (13). Для максимального перемещения ярмовых балок относительно ярма справедлива формула

$$u_{\max} = (P_{tyb} - F_T) c_y^{-1}. \quad (40)$$

Найдем минимальную силу прессовки обмоток при коротком замыкании  $P_{PR1}$ , подставив в выражение (13) максимальное перемещение ярмовых балок относительно ярма (40). В результате будем иметь

$$P_{PR1} = P_{PR} + c_w u_{PR} - c_w c_y^{-1} (P_{tyb} - F_T). \quad (41)$$



Действующая на ярмовые балки максимальная дополнительная сила  $G_{\max}$  определяется выражением

$$G_{\max} = P_{tyb} - P_{PR1}. \quad (42)$$

### 5. Числовой анализ полученных результатов

На основе выражений (1)–(42) рассчитаны усилия в обмотках ряда трансформаторов серии 110 кВ после коротких замыканий. Соответствующие максимальные силы короткого замыкания, вызывающие движение ярмовых балок (на один стержень магнитной системы)  $G_{\max}$ , представлены в таблице, где  $N_{0i}$  – усилия в обмотках после запрессовки при средней температуре всех элементов активной части 323 К (50 °С);  $F1_T, F2_T$  – максимальные силы трения покоя между ярмовыми балками и ярмом при давлении между пластинами электротехнической стали в средних пакетах ярм, равных 0,15 и 0,30 МПа;  $P1_{PR}, P2_{PR}$  – силы прессовки обмоток после коротких замыканий;  $N1_i, N2_i$  – осевые усилия в обмотках после коротких замыканий; в процентах указаны изменения сил прессовки обмоток и осевых усилий в обмотках после коротких замыканий по отношению к их начальным значениям (после запрессовки обмоток при средней температуре всех элементов активной части 323 К (50 °С)).

*Результаты расчета усилий в обмотках трансформаторов после коротких замыканий*

Трансформатор	Обмотка	$c_i 10^{-7}, Nm^{-1}$	$c_y 10^{-8}, Nm^{-1}$	$P_{PR}, P_{tyb}, кН$	$N_{0i}, кН$	$F1_T, G_{\max}, кН$	$P1_{PR}, кН$	$N1_i, кН$	$F2_T, G_{\max}, кН$	$P2_{PR}, кН$	$N2_i, кН$
ТРДН-40000/110	НН	6,170	3,267	333,1, 578,0	128,6	46,33, 385,9	299,3 -10%	117,5 -9%	92,66, 385,9	265,4 -20%	106,4 -17%
	ВН	5,555			155,5			145,5 -6%			135,5 -13%
	РО	7,091			49,04			36,28 -26%			23,52 -52%
ТРДН-63000/110	НН	5,272	4,417	348,0, 534,0	134,4	48,32, 267,3	318,6 -8%	126,4 -6%	96,64, 267,3	289,2 -17%	118,3 -12%
	ВН	6,904			155,6			145,1 -7%			134,6 -14%
	РО	7,120			58,00			47,16 -19%			36,32 -37%
ТРДН-80000/110	НН	5,994	3,909	368,1, 683,0	147,8	63,18, 460,3	328,2 -11%	134,6 -9%	126,4, 460,3	288,3 -22%	121,3 -18%
	ВН	6,327			163,2			149,2 -9%			135,2 -17%
	РО	5,730			57,1			44,43 -22%			31,76 -44%

Увеличение давления между пластинами электротехнической стали 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, в рассматриваемом случае повлекло за собой двукратное увеличение изменений сил осевой прессовки обмоток и осевых усилий в отдельных обмотках. Полученные результаты подтверждают, что за счет сил трения между ярмовыми балками и ярмом при коротких замыканиях может произойти значительное уменьшение сил прессовки обмоток, обнаруживаемое во время испытаний на стойкость трансформаторов к токам короткого замыкания [2].

Распрессовку обмоток можно ликвидировать или уменьшить, используя при их запрессовке не только верхние ярмовые балки, но и верхнее ярмо. В этом случае силы, возникающие как при запрессовке обмоток, так и во время коротких замыканий, распределяются между ярмовыми балками и ярмом, причем их большую часть примет на себя ярмо как более жесткий элемент. В качестве примера такой конструкции может служить трансформатор 154.kV.GIT элегазовый одностержневой, кото-

рый был разработан ПАО «ВИТ» для фирмы «Hyundai». За счет использования в качестве опоры при запрессовке обмоток не только верхних ярмовых балок, но и верхнего ярма максимальная сила  $P_{iyb}$ , действующая на верхние ярмовые балки при коротком замыкании, составила всего  $1,29 \cdot 10^3$  Н. Максимальная сила трения между верхними ярмовыми балками и верхним ярмом в рассматриваемом трансформаторе  $F_T = 6,48 \cdot 10^4$  Н. Эти числа показывают, что ярмовые балки не будут двигаться относительно ярма ни при запрессовке обмоток, ни во время действия сил короткого замыкания ( $P_{iyb} \ll F_T$ ). Данное заключение подтвердили и результаты испытаний трансформатора на электродинамическую стойкость. Трансформатор успешно выдержал все опыты короткого замыкания, при этом уменьшения сил осевой прессовки обмоток не было.

### Выводы

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

На примере ряда трансформаторов серии 110 кВ изучено влияние сил трения между ярмовыми балками и ярмом на осевые усилия в обмотках при коротких замыканиях. Продемонстрировано, что указанный фактор при классической конструкции активной части трансформатора существенно влияет на осевые усилия в обмотках.

Полученные результаты качественно и количественно согласуются с данными испытаний трансформаторов и в процессе эксплуатации.

### Литература

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.

*Поступила в редакцию 20.01.15*