

Выводы

Полученные основные разрешающие уравнения позволяют при заданных функции перемещений точек внешнего контура втулки и профиле поверхности трения численными расчетами, путем определения коэффициентов интенсивности напряжений, прогнозировать рост имеющейся трещины во втулке фрикционной пары; установить допустимый уровень дефектности и максимальные значения рабочих нагрузок, обеспечивающие достаточный запас надежности. Решение задачи оптимального проектирования по определению функции перемещений точек наружного контура втулки позволяет на стадии проектирования выбирать оптимальные геометрические параметры элементов фрикционной пары, обеспечивающие повышение несущей способности.

Литература

1. Галин, Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М.: Наука, 1980. – 303 с.
2. Goryacheva, I. G. Contact mechanics in Tribology / I. G. Goryacheva. – Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1998. – 344 p.
3. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
4. Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
5. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
6. Паркус, Г. Неустановившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
7. Панасюк, В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацышин. – Киев: Наук. думка, 1976. – 443 с.
8. Мирсалимов, В. М. Неоднородные упругопластические задачи / В. М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

Поступила в редакцию 20.03.15

И. В. Лазарев

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

УДК 621.314.21.045.001.5

ПРОВЕРКА ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДНИКОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Для обмоток силовых трансформаторів стрижневого типу розроблено метод перевірки міцності провідників усіх застосовуваних типів перерізу при згинанні осьовими та радіальними електромагнітними силами коротких замикань. Вивчено вплив ряду факторів на міцність провідників і показано шляхи її підвищення. Результати роботи використовуються для розрахунку електродинамічної стійкості обмоток при коротких замиканнях.

Ключові слова: трансформатор, обмотка, коротке замикання, вигин, міцність провідників.

Введение

Действие электромагнитных сил на катушки обмоток силовых трансформаторов [1] порождает в их проводниках напряжения при изгибах в осевом и радиальном направлениях, а также напряжения растяжения или сжатия. Некоторыми предприятиями используется расчет прочности проводников по допускаемым напряжениям [2]: суперпозиция перечисленных трех напряжений не должна превышать допускаемое напряжение, за которое принимается предел текучести материала проводников или близкое к нему значение [3]. Однако, как показано в [4], уже при изготовлении обмотки в проводниках возникают напряжения, превышающие предел пропорциональности, а во многих случаях и предел текучести материала проводников. При таких условиях принцип суперпозиции напряжений не применим, и уже в исходном состоянии до приложения электромагнитных сил короткого замыкания проводники не удовлетворяют условию прочности по допускаемым напряжениям.

В [5] представлен полупластический метод расчета изгибной прочности проводников для обмоток трансформаторов броневого типа. Учитывается, что наибольшие напряжения изгиба могут превышать предел пропорциональности. Однако рассмотрен изгиб проводников только от осевых электромагнитных сил. В трансформаторах стержневого типа с цилиндрическими обмотками на проводники действуют также радиальные электромагнитные силы, которые могут вызывать помимо растяжения или сжатия проводников их изгиб в радиальном направлении.

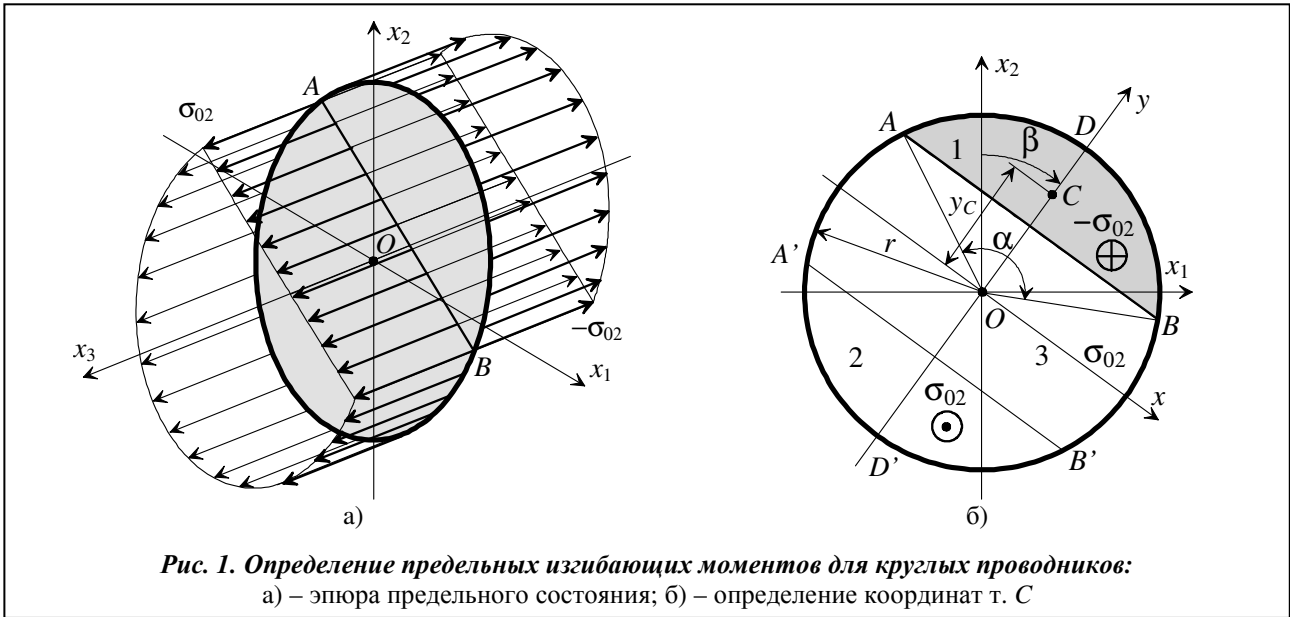
Изгиб проводников от радиальных электромагнитных сил всегда имеет место в обмотке с радиальными опорами. Если радиальные опоры достаточно жесткие, а расстояние между ними незначительно, то кривизну проводов можно не учитывать, считая, что вся радиальная нагрузка воспринимается за счет деформаций изгиба проводников и полностью передается на опоры. В случае многоконцентрковой обмотки изгиб проводников от радиальных электромагнитных сил может иметь место и при отсутствии радиальных опор (концентр – часть обмотки, которая отделена от других ее частей осевыми каналами, образованными с помощью реек).

1. Методика проверки прочности

Учитывая напряжения изгиба, возникающие при намотке [4], предлагается проверку прочности проводников при изгибе проводить по предельному состоянию [2]. Предельным считается такое состояние, при котором напряжение в каждой точке опасного сечения проводника равно условному пределу текучести (σ_{02}). Распределение этих напряжений по сечению проводника обусловлено тем, что он должен сопротивляться изгибам в осевом и радиальном направлениях и растяжению или сжатию в окружном направлении. Для этого в сечении проводника должны быть области, в которых напряжения противоположны по направлению и самоуравновешены. В оставшейся части сечения напряжения обусловлены сопротивлением растяжению или сжатию в окружном направлении. Такое состояние дает предельные моменты для изгиба проводников в осевом и радиальном направлениях (M_{1lim} , M_{2lim}) и предельную окружную силу (N_{lim}). Прочность при изгибе проводников обеспечена, если максимальные изгибающие моменты в опасном сечении проводника от осевых и радиальных электромагнитных сил короткого замыкания (M_{1max} , M_{2max}) не превышают соответственно предельные моменты (M_{1lim} , M_{2lim}).

2. Определение изгибающих моментов и анализ полученных результатов

Учтем, что радиальные и осевые электромагнитные силы распределены равномерно по окружности обмотки. Деформации изгиба в осевом направлении симметричны относительно столбов прокладок, а в радиальном направлении – относительно реек, образующих осевые каналы. С учетом сказанного во введении, считая кривизну проводников малой, участок проводника между столбами прокладок и рейками можно рассматривать как балку с заземленными краями, нагруженную равномерно распределенными радиальными и осевыми силами. Выражения для максимальных изгибающих моментов такой балки известны [2]. Необходимо определить, какая часть радиальных электромагнитных сил вызывает изгиб проводников в случае многоконцентрковой обмотки. Учтем, что при действии радиальных сил деформации сжатия изоляции между проводниками пренебрежимо малы. Более нагруженные проводники всегда опираются на менее нагруженные, все проводники деформируются только совместно, получая одно и то же радиальное перемещение. Радиальный размер обмотки мал по сравнению с ее диаметром, поэтому примем диаметр каждого проводника равным среднему диаметру обмотки. Тогда при действии радиальной нагрузки во всех проводниках окружные деформации будут одинаковыми, соответствующие окружные напряжения будут одинаковыми и равными среднему напряжению обмотки σ_w . Отсюда каждый концентр, в котором среднее окружное напряжение от действующих на него радиальных электромагнитных сил σ_c меньше среднего напряжения обмотки ($\sigma_c < \sigma_w$), будет только сжиматься или растягиваться от действия собственной радиальной нагрузки и радиальной нагрузки, передающейся на него от концентров с $\sigma_c > \sigma_w$. У концентров с $\sigma_c > \sigma_w$, часть радиальной электромагнитной нагрузки, соответствующая σ_w , будет восприниматься проводниками за счет окружных деформаций, а часть, соответствующая разности $\sigma_c - \sigma_w$, будет передаваться через рейки на менее нагруженные радиальными электромагнитными силами концентры. Эта часть радиальной нагрузки и будет вызывать изгиб проводников в радиальном направлении между рейками.



Найдем (M_{1lim} , M_{2lim}) для проводника круглого сечения с радиусом r . Эпюра напряжений для предельного состояния показана на рис. 1. Оси x_1 и x_2 направлены вдоль радиуса и оси обмотки, x_3 – ось проводника (рис. 1, а). В сечении условно можно выделить три области, обозначенные цифрами 1, 2, 3 (рис. 1, б). В сегментах 1 и 2 напряжения противоположны, их равнодействующие уравновешены. Эти напряжения дают предельные изгибающие моменты относительно осей x_1 и x_2

$$M_{1lim} = \int_{F_1} \sigma_{02} x_2 dx_1 dx_2 + \int_{F_2} \sigma_{02} x_2 dx_1 dx_2; \quad (1)$$

$$M_{2lim} = \int_{F_1} \sigma_{02} x_1 dx_1 dx_2 + \int_{F_2} \sigma_{02} x_1 dx_1 dx_2; \quad (2)$$

где F_i – площадь i -й части сечения.

В области 3 напряжения сводятся только к равнодействующей N_{lim} , приложенной в центре сечения проводника (т. O)

$$N_{lim} = \int_{F_3} \sigma_{02} dx_1 dx_2. \quad (3)$$

Выполнив интегрирование в выражениях (1)–(3), получим

$$M_{1lim} = 2\sigma_{02}F_1y_C \cos\beta; \quad M_{2lim} = 2\sigma_{02}F_1y_C \sin\beta; \quad N_{lim} = \sigma_{02}F_3, \quad (4)$$

где

$$F_1 = \frac{r^2}{2}(\alpha - \sin\alpha); \quad y_C = \frac{r^3}{6F_1} \left(3\sin\frac{\alpha}{2} - \sin\frac{3\alpha}{2} \right); \quad F_3 = r^2(\pi - \alpha + \sin\alpha); \quad (5)$$

y_C – координата центра тяжести сегмента 1 в системе xOy , рис. 1, б.

В (4), (5) не известны углы α и β , определяющие величину и положение сегмента 1. Эти углы найдем, используя следующие условия.

1) Равнодействующая σ_w в проводнике не должна превышать N_{lim}

$$\sigma_w F \leq \sigma_{02} F_3, \quad (6)$$

где F – площадь сечения проводника.

2) Значения M_{1lim} , M_{2lim} должны удовлетворять соотношению

$$M_{1lim} \cdot M_{2lim}^{-1} = M_{1max} \cdot M_{2max}^{-1}. \quad (7)$$

Будем считать, что (6) выполняется как равенство. Тогда, подставляя в (6) и (7) выражения для F_i и M_{1lim} , M_{2lim} , получим уравнения для углов α и β

$$\alpha - \sin\alpha + \pi \cdot (\sigma_w \cdot \sigma_{02}^{-1} - 1) = 0; \tag{8}$$

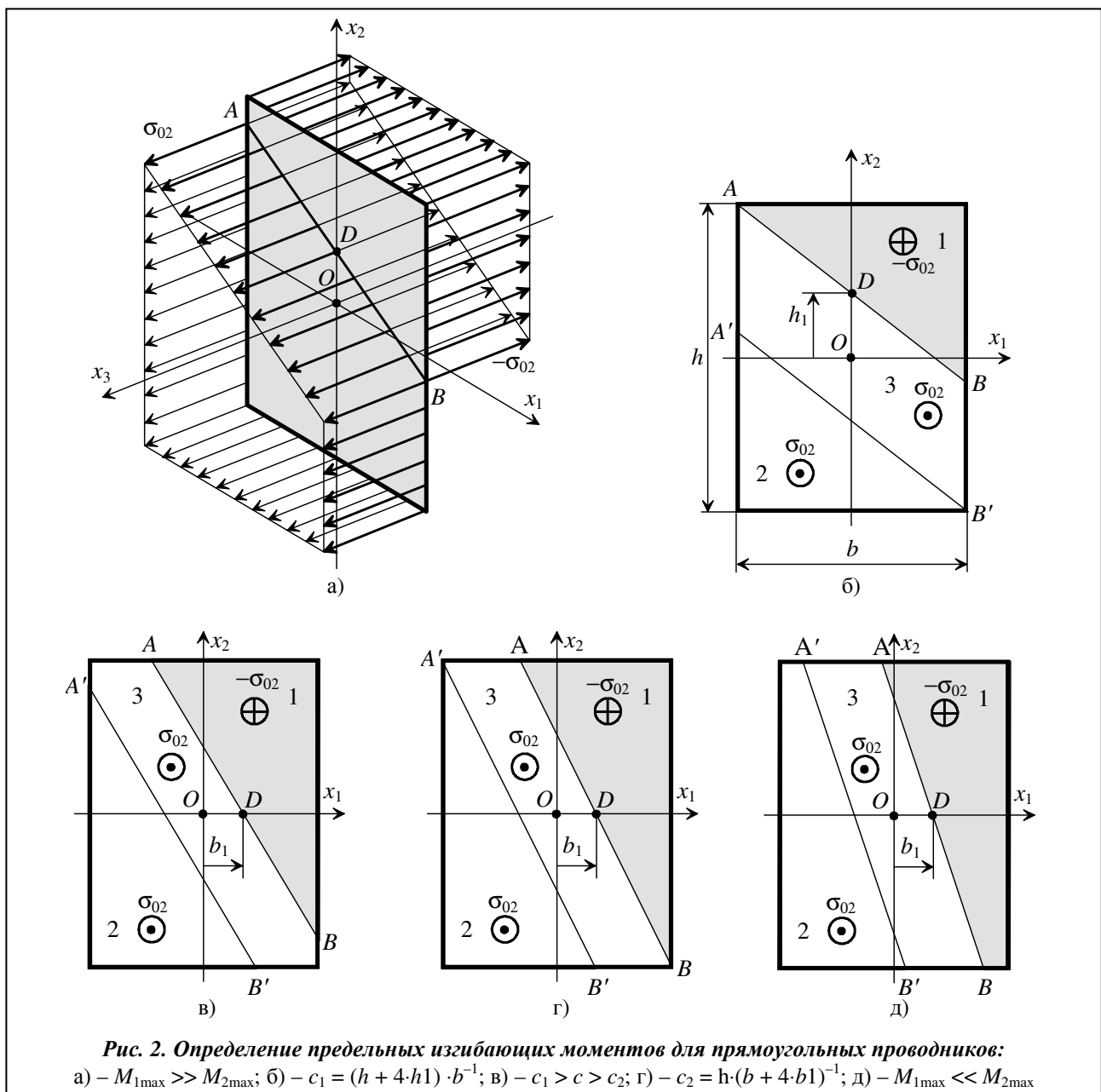
$$\beta = \text{arccctg}(c), \tag{9}$$

где $c = M_{1\max} \cdot M_{2\max}^{-1}$.

При отсутствии окружных деформаций, а значит, $\sigma_w = 0$ уравнение (8) удовлетворяется при $\alpha = \pi$. Величины F_i получают значения: $F_1 = F_2 = \pi r^2 \cdot 2^{-1}$; $F_3 = 0$. Эти результаты показывают, что нейтральная линия проходит через центр тяжести сечения проводника, разделяя его на две одинаковые области с напряжениями противоположного знака. Способность проводника сопротивляться деформациям полностью используется для противодействия изгибу.

Рассмотрим изгиб прямоугольного проводника. Эпюры предельных состояний показаны на рис. 2. Величины $M_{1\lim}$, $M_{2\lim}$ также определяются (1) и (2), однако необходимо установить положение нейтральной линии AB . Оно зависит от величины, равнодействующей N_{\lim} , и отношения $M_{1\max}/M_{2\max}$.

Если $M_{1\max} \gg M_{2\max}$, то эпюра предельных состояний будет иметь вид, показанный на рис. 2, а. Используя (1), (2), (6), (7), получим



$$M_{1\lim} = \sigma_{02} \cdot b \cdot \left(\frac{h^2}{4} - h1^2 - \frac{x^2}{3} \right), \quad M_{2\lim} = \frac{1}{3} \sigma_{02} \cdot b^2 \cdot x, \quad (10)$$

где

$$x = -\frac{c \cdot b}{2} + \sqrt{\left(\frac{c \cdot b}{2} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{h^2}{4} - h1^2 \right)}; \quad h1 = \frac{h \cdot \sigma_w}{2 \cdot \sigma_{02}}. \quad (11)$$

Уменьшение отношения между максимальными изгибающими моментами c будет сопровождаться поворотом нейтральной линии по часовой стрелке вокруг т. D . При некотором значении $c = c_1$ нейтральная линия займет положение, показанное на рис. 2, б. При значениях параметра $c < c_1$ (расположении нейтральной линии как на рис. 2, в выражения (10), (11) теряют свою справедливость. Они верны только при выполнении условия

$$c \geq c_1. \quad (12)$$

Параметр c_1 равен отношению $M_{1\lim}/M_{2\lim}$ для состояния на рис. 2, б:

$$c_1 = (h + 4 \cdot h1) \cdot b^{-1}. \quad (13)$$

Для предельного состояния на рис. 2, в $M_{1\lim}$ и $M_{2\lim}$ определяются аналогично предыдущему. Окончательные результаты имеют вид

$$M_{1\lim} = \sigma_{02} \cdot x1 \cdot x2 \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{x2}{3} \right), \quad M_{2\lim} = \sigma_{02} \cdot x1 \cdot x2 \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{x1}{3} \right), \quad (14)$$

где

$$x1 = -\frac{3}{4} \left(\frac{h}{c} - b \right) + \sqrt{\frac{9}{16} \left(\frac{h}{c} - b \right)^2 + \frac{1}{c} \left(1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_{02}} \right) \cdot b \cdot h}; \quad x2 = \left(1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_{02}} \right) \cdot \frac{b \cdot h}{x1}. \quad (15)$$

Уменьшая далее c , при некотором значении $c = c_2$ придем к состоянию на рис. 2, г. При $c < c_2$ (14), (15) теряют свою справедливость. Значение c_2 определяется так же, как c_1 , и равно

$$c_2 = h \cdot (b + 4 \cdot b1)^{-1}, \quad (16)$$

где

$$b1 = b \cdot \sigma_w \cdot (2 \cdot \sigma_{02})^{-1}. \quad (17)$$

При $c \leq c_2$ получим предельное состояние на рис. 2, д, для которого

$$M_{1\lim} = \frac{1}{3} \sigma_{02} \cdot h^2 \cdot y, \quad M_{2\lim} = \sigma_{02} \cdot h \cdot \left(\frac{b^2}{4} - b1^2 - \frac{y^2}{3} \right), \quad (18)$$

где

$$y = -\frac{h}{2 \cdot c} + \sqrt{\left(\frac{h}{2 \cdot c} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{b^2}{4} - b1^2 \right)}. \quad (19)$$

Анализируя результаты для проводников прямоугольного сечения, придем к тем же выводам, что и в случае проводников круглого сечения.

Определим $M_{1\lim}$, $M_{2\lim}$ для проводника прямоугольного сечения с учетом закруглений его углов. Величины F_i зависят от параметров (k, h_1) нейтральной линии $x_2(x_1) = k \cdot x_1 + h_1$ и функции границы сечения

$$fh(x_1) = \left\{ \Phi(|x_1|) - \Phi \left[|x_1| - \left(\frac{b}{2} - r \right) \right] \right\} \cdot \frac{h}{2} + \left\{ \Phi \left[|x_1| - \left(\frac{b}{2} - r \right) \right] - \Phi \left(|x_1| - \frac{b}{2} \right) \right\} \left\{ \left(\frac{h}{2} - r \right) + \sqrt{r^2 - \left[|x_1| - \left(\frac{b}{2} - r \right) \right]^2} \right\}, \quad (20)$$

где r – радиус закругления углов сечения проводника; $\Phi(x_i - a)$ – функция Хэвисайда. Поменяв местами в (20) b и h , и заменив x_1 на x_2 , получим аналогичную функцию $fb(x_2)$.

Выражения (1)–(3) и условия (6) (7) образуют систему уравнений

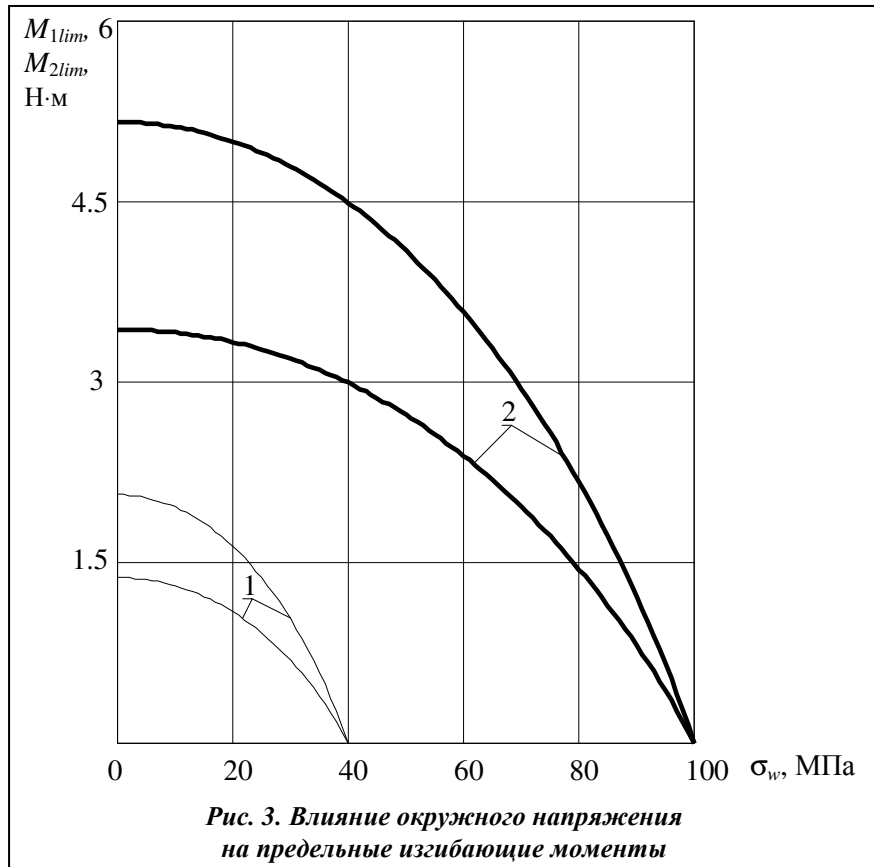
$$\begin{cases} \frac{\int_{F_1(k, h_1, fh(x_1))} \sigma_{02} x_1 dx_1 dx_2 + \int_{F_2(k, h_1, fh(x_1))} \sigma_{02} x_1 dx_1 dx_2}{F_1(k, h_1, fh(x_1))} - \frac{M_{2max}}{M_{1max}} = 0; \\ \frac{\int_{F_1(k, h_1, fh(x_1))} \sigma_{02} x_2 dx_1 dx_2 + \int_{F_2(k, h_1, fh(x_1))} \sigma_{02} x_2 dx_1 dx_2}{F_1(k, h_1, fh(x_1))} - \frac{M_{2max}}{M_{1max}} = 0; \\ \int_{F_3(k, h_1, fh(x_1))} dx_1 dx_2 - \frac{\sigma_w F}{\sigma_{02}} = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Система (21) решается численно относительно k, h_1 методом скорейшего покоординатного спуска [6]. Параметры k, h_1 используются для расчета $M_{1lim}, M_{2lim}, N_{lim}$ с помощью (1)–(3).

Если $M_{1max}/M_{2max} > b/h$, удобно «повернуть» задачу на 90° и решать (21) относительно параметров k', b_1 нейтральной линии $x_1(x_2) = k' \cdot x_2 + b_1$, используя описание контура сечения функцией $fb(x_2)$.

3. Численный анализ результатов

На основе выражений (1)–(21) произведен численный анализ полученных результатов на ЭВМ. Рассмотрена обмотка с проводниками прямоугольного сечения ($b = 5,0$ мм, $h = 8,0$ мм, $r = 1,0$ мм). На проводники действует электромагнитная нагрузка, при которой $M_{1max} = 1,5$ Н·м, $M_{2max} = 1,0$ Н·м, $\sigma_w = 15$ МПа. При заданном соотношении M_{1max}/M_{2max} варьировалось значение σ_w в пределах от 0 до σ_{02} . Графики изменения предельных моментов показаны на рис. 3. Линии 1 получены для проводников из алюминия ($\sigma_{02} = 40$ МПа); линии 2 – для проводников из отожженной меди ($\sigma_{02} = 100$ МПа). Верхние линии в каждой из пар кривых отображают изменение M_{1lim} , а нижние – M_{2lim} . Расстояние между графиками предельных моментов и их относительное расположение зависит



от соотношения M_{1max}/M_{2max} . При $\sigma_w = 0$ площадь области 3 (рис. 2, б) равна нулю. Нейтральная линия проходит через центр тяжести сечения, а ее угол наклона определяется соотношением M_{1max}/M_{2max} . Площади областей 1 и 2 максимальны; вся несущая способность проводников идет на сопротивление изгибам, чему соответствуют наибольшие значения M_{1lim} и M_{2lim} .

По мере возрастания σ_w область 3 увеличивается, а области 1 и 2 уменьшаются. Это приводит к уменьшению предельных M_{1lim} и M_{2lim} , так как все большая часть несущей способности проводников тратится на сопротивление деформациям растяжения или сжатия обмотки в радиальном направлении, которым соответствует σ_w . В случае $\sigma_w = \sigma_{02}$ область 3 охватывает все сече-

ние проводника, а области 1 и 2 исчезают, чему соответствуют $M_{1lim} = 0$, $M_{2lim} = 0$, то есть при $\sigma_w = \sigma_{02}$ вся несущая способность проводников идет на сопротивление деформациям растяжения или сжатия обмотки в радиальном направлении, по этой причине в точке $\sigma_w = \sigma_{02}$ кривые изменения M_{1lim} и M_{2lim} пересекаются.

Результаты, представленные на рис. 4, иллюстрируют влияние размеров (площади) сечения проводников на их прочность при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами короткого замыкания.

Построены зависимости, аналогичные представленным на рис. 3. Рассматривались обмотки, имеющие проводники из алюминия ($\sigma_{02} = 40$ МПа) прямоугольного сечения с размерами $b = 5,0$ мм, $h = 8,0$ мм, $r = 1,0$ мм (линии 1.1 и 1.2) и круглого сечения с диаметром $d = 5,0$ мм (кривые 3.1, 3.2). Такие же зависимости были построены для проводников, у которых соответствующие размеры сечения увеличены на 20%. Линии 2.1, 2.2 на рис. 4 соответствуют обмотке, у которой проводники имеют прямоугольное сечение с размерами $b = 6,0$ мм, $h = 9,6$ мм, линии 4.1, 4.2 – круглое сечение с диаметром $d = 6,0$ мм. Увеличение на 20% размеров сечения проводников привело к значительному увеличению предельных изгибающих моментов M_{1lim} и M_{2lim} . Таким образом, изменение размеров сечения проводников является эффективным способом влияния на их прочность при изгибе.

Влияние радиуса закругления углов прямоугольного сечения проводников на прочность при изгибе отражают результаты, показанные на рис. 5.

Рассматривалась обмотка, имеющая проводники из меди ($\sigma_{02} = 100$ МПа) с размерами $b = 1,0$ мм, $h = 5,0$ мм. Строились зависимости M_{1lim} и M_{2lim} от N_{lim} при нулевом радиусе закругления углов сечения $r = 0$ (линии 1.1, 1.2), и радиусе согласно нормативной документации на провода $r = 0,5$ мм (кривые 2.1, 2.2). По оси абсцисс откладываются значения N_{lim} , соответствующие σ_w , варьируемому от 0 до σ_{02} при $M_{1max}/M_{2max} = 1.5$. Кривые пересекаются при значениях N_{lim} , соответствующих $\sigma_w = \sigma_{02}$. При $r = 0$ предельные изгибающие моменты имеют заметно большие значения, чем при реальном радиусе ($r = 0,5$ мм), особенно когда значения σ_w близки к σ_{02} . Следовательно, выполнять расчеты по проверке прочности проводников при их изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами без учета закруглений углов сечений нельзя.

Результаты расчетов, произведенных путем решения уравнений (21) для случаев $r = 0$ (прямоугольное сечение без учета закруглений углов) и $b = h = 2r$ (круглое сечение) и выполненных по полученным ранее соотношениям для этих типов сечений, совпадают. Таким образом, полученные ранее результаты являются частными случаями теории, учитывающей закругления углов прямоугольного сечения проводников.

Полученный метод проверки прочности проводников применяется для практических расчетов. В таблице представлены результаты расчета на прочность при изгибе проводников обмоток ряда трансформаторов, испытанных на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях.

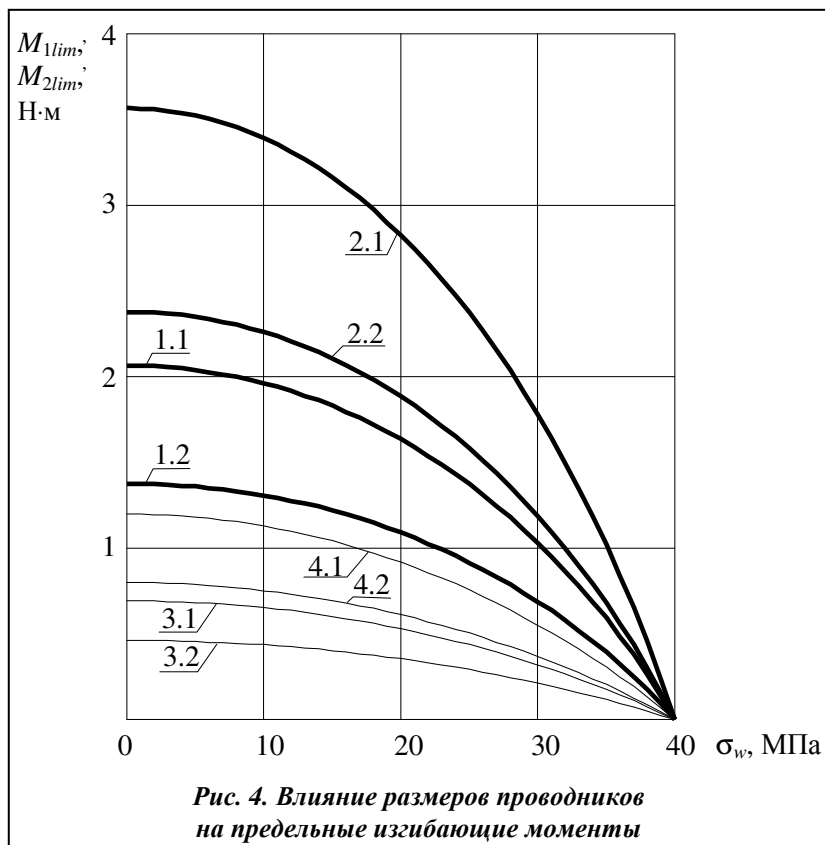


Рис. 4. Влияние размеров проводников на предельные изгибающие моменты

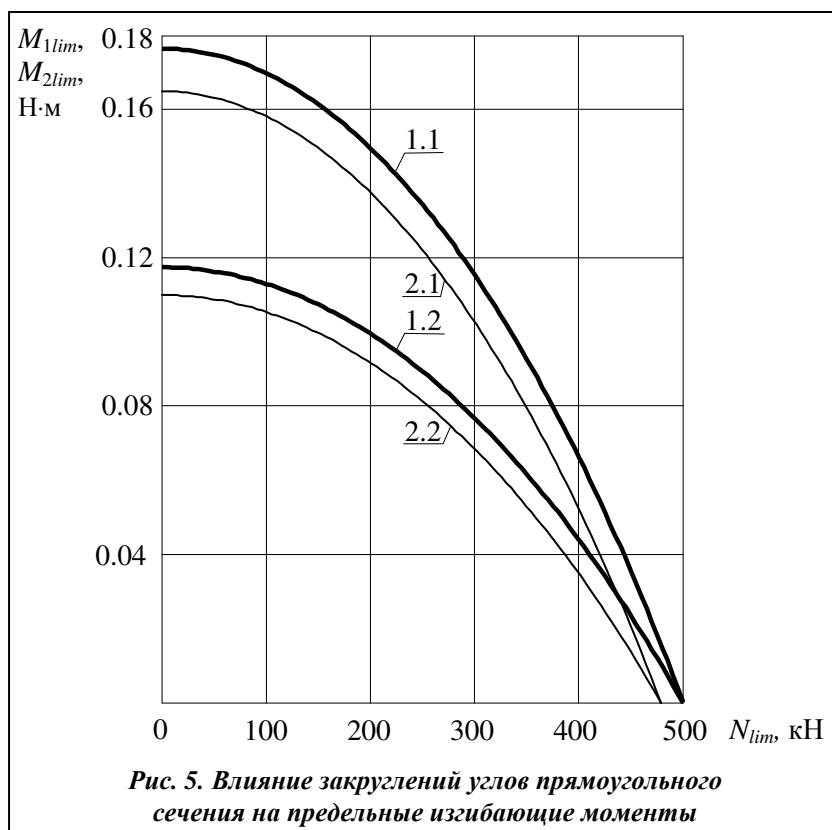


Рис. 5. Влияние закруглений углов прямоугольного сечения на предельные изгибающие моменты

Расчеты проводились с учетом закруглений углов сечений проводников. Радиусы закруглений определялись по нормативным документам на провода. Для ГИТ-154 и 26/32/11.5 приведены данные по нескольким режимам короткого замыкания. Проверяемые обмотки в этих трансформаторах состоят из одного концентратора, чем объясняется отсутствие радиальных изгибающих моментов. В трансформаторе 70000/220 рассчитываемая обмотка состоит из двух концентраторов, что приводит к возникновению радиальных изгибающих моментов во внешнем концентре. Во всех случаях предельные изгибающие моменты значительно больше максимальных, то есть прочность проводников при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами обеспечена. Все представленные

трансформаторы успешно выдержали испытания на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях, что соответствует результатам расчетов по разработанной методике.

Результаты расчета изгибной прочности проводников

Трансформатор (страна)	Обмотка, концентр	b, мм	h, мм	σ_w , МПа	M_{1max} , Н·м	M_{1lim} , Н·м	M_{2max} , Н·м	M_{2lim} , Н·м
ГИТ-154, 20 MVA элегазовый (Южная Корея)	ВН	3	7,1	9,08	0,381	2,839	0	-
				9,3	0,385	2,838		
				14,9	0,124	2,777		
				14,96	0,03	2,776		
70000/220 (Индия)	ВН, 1	3	11,9	4,89	0,56	14,408	0	-
	ВН, 2			18,4	0,58	13,950	0,026	0,5334
26/32/11.5 (Иран)	ВН	2,36	10,6	29,47	0,128	4,3899	0	-
				38,13	0,02	3,8733		
				38,99	0,0045	3,8416		
				39,5	0,011	3,8416		
				39,55	0,009	3,8385		

Выводы

Разработан метод проверки прочности проводников прямоугольного и круглого сечения обмоток силовых трансформаторов при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами короткого замыкания.

Рассмотрены обмотки силовых трансформаторов с проводниками прямоугольного сечения при наличии закругления его углов. Получена система уравнений для определения предельных изгибающих моментов в проводниках при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами короткого замыкания. Предложен численный метод ее решения.

С помощью полученных результатов можно выполнять расчеты для обмоток, имеющих проводники круглого и прямоугольного сечений без учета и с учетом закруглений его углов. Таким образом, разработан обобщенный метод проверки прочности проводников при изгибе осевыми и радиальными электромагнитными силами короткого замыкания, распространяющийся на все формы сечений проводников, применяемых в силовых трансформаторах.

Метод проверки прочности проводников применяется при расчетах электродинамической стойкости обмоток трансформаторов при коротких замыканиях. Результаты испытаний трансформаторов подтверждают достоверность полученных результатов.

Литература

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров : Уч. пособие для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1986 – 528 с.
2. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1975. – 704 с.
3. *Руководящий документ* РД 16 431-88 «Трансформаторы силовые. Расчет электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании». – М.: Изд-во ВЭИ, 1977. – 95 с.
4. Лазарев, В. И. Влияние прочностных характеристик материала проводников на критические напряжения радиальной устойчивости обмоток трансформаторов / В. И. Лазарев // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України. – 2003. – № 3 (6). – С. 80–86.
5. *The Coil Mechanical Behavior under the Short Circuit* / E. Tamaki, A. Kishi, S. Itoh et al. // Mitsubishi Electric Corporation, Japan. CIGRE Transformer Colloquium 1999 in Budapest.
6. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

Поступила в редакцию 15.02.15

И. В. Янчевский,

д-р физ.-мат. наук

Институт механики

им. С. П. Тимошенко

НАН Украины

г. Киев, e-mail:

yanchevsky@ukr.net

УДК 534.1:539.3

К ПРОБЛЕМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ, ПРИЛОЖЕННОГО К УПРУГО-ДЕФОРМИРУЕМОМУ ЭЛЕМЕНТУ КОНСТРУКЦИИ

Викладена методика ідентифікації залежності від часу нестационарного впливу, розподіленого на заданій області конструктивного елемента довільної геометрії, за значеннями величини, яка вважається більш доступною для виміру. У припущенні того, що реакція елемента лінійно залежить від шуканого впливу, розглянута задача зведена до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів, через які шуканий вплив апроксимується кусково-сталою функцією. Для розв'язання системи використовується регуляризуючий алгоритм, який забезпечує стійкість результату до випадкових помилок у вхідних даних і похибок обчислень. Наведені результати конкретних розрахунків, які свідчать про ефективність методики.

Введение

Развитие современной техники неразрывно связано с проектированием новых и совершенствованием существующих конструктивных элементов, удовлетворяющих требуемому комплексу механических характеристик. Для достижения этих целей, помимо надежных методов расчета, важно наличие полной и достоверной информации о действующих в процессе эксплуатации этих элементов внешних воздействиях (как механической, так и иной физической природы). Наиболее рациональный подход для их определения предполагает их непосредственное измерение. Однако существует множество ситуаций, когда этот подход либо затруднен, либо требует модификации самой конструкции