

*д.т.н. Заблодский Н.Н.,
к.т.н. Рубежанский В.И.,
Лукьянов Н.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ФЕРРОМАГНИТНОГО РОТОРА ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Подані основні положення методики розрахунку внутрішніх механічних напружень полого ферромагнітного ротора шнекового ПЕМП.

Ключові слова: порожнистий ферромагнітний ротор, внутрішні механічні напруги.

Представлены основные положения методики расчета внутренних механических напряжений полого ферромагнитного ротора шнекового ПЭМП.

Ключевые слова: полый ферромагнитный ротор, внутренние механические напряжения.

Анализ электромагнитного поля в массивных ферромагнитных частях электрических машин является сложной задачей из-за нелинейности характеристик намагничивания. Актуальность такого анализа возросла в связи с общим развитием электромашиностроения. Решение, в котором учтено, что магнитная проницаемость является функцией напряженности магнитного поля дано в [1]. Согласно концепции [2,3] изменение магнитной проницаемости от глубины проникновения электромагнитной волны можно учитывать с помощью полуэмпирических постоянных поправочных коэффициентов, которые связывают значения проницаемости на поверхности тела и эквивалентной проницаемости, соответствующей заранее неизвестной напряженности магнитного поля в глубине данного тела. Однако возможности использования названных поправочных коэффициентов ограничены конструктивными структурами, где можно пренебречь влиянием на электрические и магнитные свойства температурных воздействий, процессами отражения электромагнитной волны и механическими внутренними напряжениями в массиве металла.

С появлением нового класса полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) технологического назначения [4], где

активные подвижные части испытывают одновременно комбинированное воздействие нескольких видов нагружения, проблема точного определения параметров, мощностей и характеристик при проникновении двухсторонней плоской и цилиндрической волн стоит очень остро. Очевидно, что решение необходимо искать в результатах тщательных исследований по установлению зависимостей электрофизических величин массива при тепловых, механических и электромагнитных воздействиях.

Работа посвящена рассмотрению одной из компонент комплексного воздействия — внутренних механических напряжений подвижной активной части ПЭМП.

Цель работы—разработка методики расчета внутренних механических напряжений полого ферромагнитного ротора шнекового ПЭМП.

Кручение тонкостенного цилиндра(ротора)

На рисунке 1 представлена конструктивная схема шнекового ПЭМП, включающая полый ферромагнитный ротор (ПФР), охватывающий статоры двигательного (ДМ) и тормозного (ТМ) модулей, закрепленных на полом неподвижном вале.

На этом же рисунке представлена эпюра крутящих моментов, воздействующих на ПФР при его вращении под действием результирующего электромагнитного момента. Нагрузочный равномерно распределенный по внешней поверхности ротора момент создается силами трения при транспортировке и перемешивании сыпучего или вязкого материала.

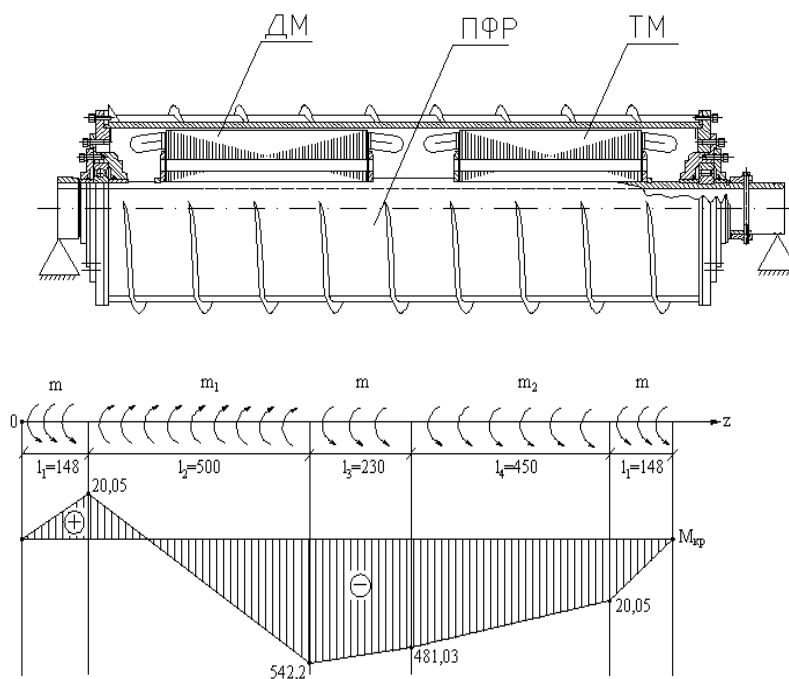


Рисунок 1 – Конструктивно – расчетная схема и эпюра моментов шнекового ПЭМП

Для конкретного определения зон максимального воздействия крутящих моментов и возникающих при этом внутренних напряжений использованы числовые данные, полученные при исследованиях экспериментального образца шнекового ПЭМП с активной мощностью 70кВт и частотой вращения ротора – шнека 100 об/мин, предназначенного для сушки и транспортировки древесных опилок и отходов растениеводства.

Электромагнитные моменты, создаваемые модулями ПЭМП, составляют соответственно $M_{эм1}=600 \text{ Нм}$ (для ДМ) и $M_{эм2}=400 \text{ Нм}$ (для ТМ).

Система нагружения – равномерно распределенные по поверхности цилиндра (ротора) пары сил. Интенсивности пар m_1, m_2, m определяются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{M_{эм1}}{\pi D l_2} - \frac{M_H}{\pi D L}, \\ m_2 &= \frac{M_{эм2}}{\pi D l_4} + \frac{M_H}{\pi D L}, \\ m &= \frac{M_H}{\pi D L}, \end{aligned} \quad (1)$$

где D – внешний диаметр ротора; l_2, l_4 – длины активных участков ротора, равные длинам пакетов статоров ДМ и ТМ; l_1, l_3 – концевые зоны ротора; L – общая длина ротора.

Величина нагрузочного момента M_H определяется из условия равновесия моментов цилиндра при установившейся частоте вращения.

Определение касательных напряжений

При заданной схеме нагружения цилиндра возникают обычные напряжения τ в поперечных сечениях и касательные напряжения t в цилиндрических и осевых сечениях[5].

Распределение этих напряжений по объему, представленное на рисунке 2, подчиняется следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{16m}{\pi D^3} r z, \\ t &= \frac{4m}{\pi D} r^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где r – радиус цилиндра.

Отношение $\tau_{max}/t_{max} = 8l/D$ указывает на то, что для данного цилиндра $t_{max} \ll \tau_{max}$. Например, в нашем случае на длине l_1 : $\tau_{max} > t_{max}$ в 3 раза, а на длине l_2 – соответственно в 10,15 раза.

Определим максимальные касательные напряжения в сечениях. Примем, как и при обычном кручении, что зависимости касательных напряжений τ справедливы и для полых цилиндров.

Тогда:

$$\tau_{\max z=l} = \frac{16m}{\pi D^3(1-C^4)} \frac{D}{2} l, \quad (3)$$

где $C=d/D$ – соотношение внутреннего и внешнего диаметров цилиндра.

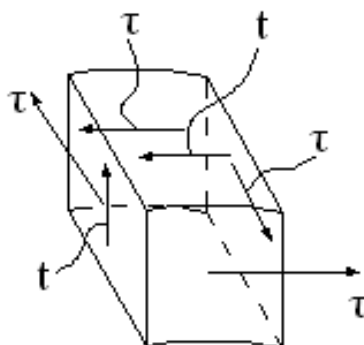


Рисунок 2 –Схема касательных воздействий в цилиндрических и осевых сечениях

Расчет напряжений при распределенном скручивающем моменте

Скручивающие моменты приложены к поверхности цилиндра. Выделим двумя цилиндрическими поверхностями "r", "r+dr" и двумя поперечными сечениями элементарное кольцо толщиной dz. Расчетная схема определения возникающих напряжений показана на рисунке 3.

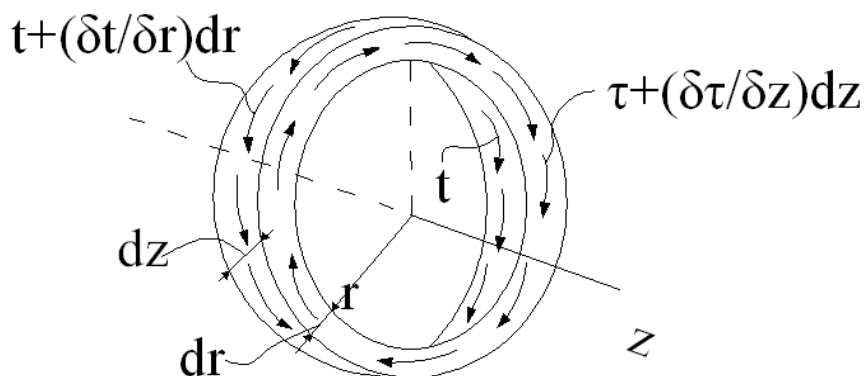


Рисунок 3– Расчетная схема элементарного кольца полого ротора

Условие равновесия кольца (сумма моментов сил относительно оси z):

$$r^2 \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} (tr^2). \quad (4)$$

Пусть V – перемещение по касательной к дуге круга, угол сдвига $\gamma_1 = \partial V / \partial z$. Распределение перемещений и углов сдвига при кручении представлены на рисунке 4.

Угол сдвига и напряжение определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\partial V}{\partial z}, \\ \tau &= G \frac{\partial V}{\partial z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где G – модуль сдвига или модуль упругости второго рода.

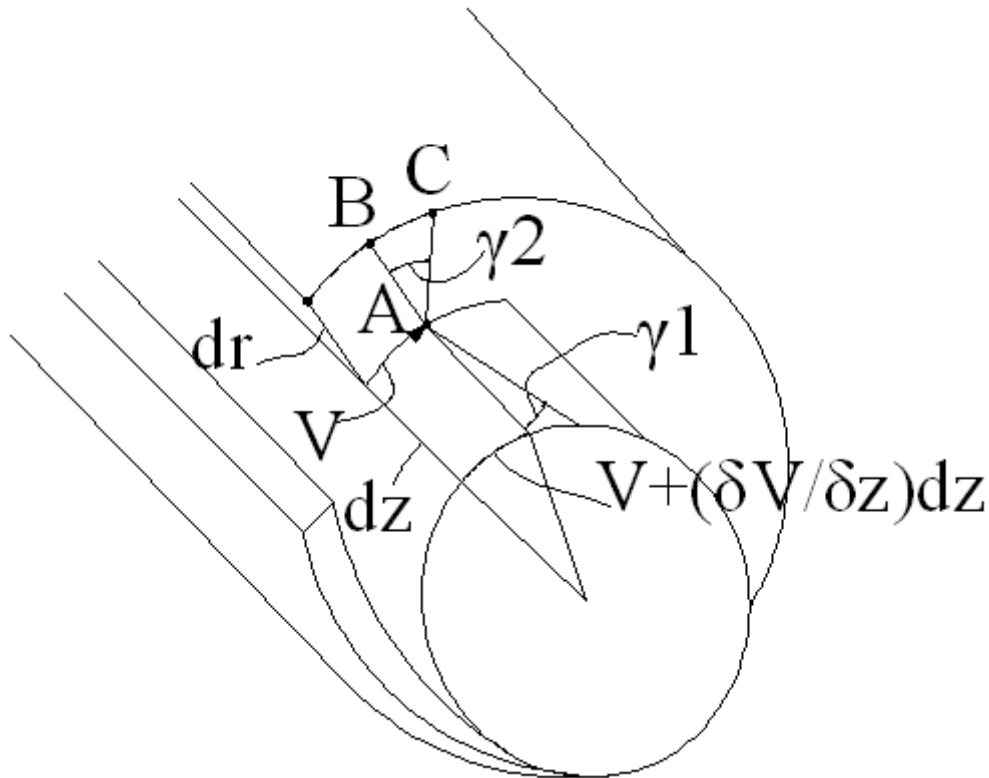


Рисунок 4 – Перемещение по касательным к дуге круга и углы сдвига в сплошном цилиндре

Угол сдвига γ_2 в плоскости поперечного сечения равен соотношению $\gamma_2 = BC/AB$. Здесь $AB = dr$, а $BC = V + \frac{\partial V}{\partial r} dr - V \frac{r+dr}{r}$. В результате угол γ_2 определяется выражением:

$$\gamma_2 = \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r},$$

а напряжение

$$t = -G \left(\frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r} \right). \quad (6)$$

Подставляя (5),(6) в (4), находим уравнение перемещения:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (Vr) \right] = 0.$$

Его решение имеем в виде $V = V_0(t) + V_1(r)z + V_2(r)z^2$.

В соответствии с [6] к структурно-чувствительным магнитным и электрическим характеристикам относятся: начальная и максимальная магнитные проницаемости; напряженность намагничивающего поля, соответствующая максимальной магнитной проницаемости; остаточная намагниченность; коэрцитивная сила; удельное электрическое сопротивление.

Предварительные расчеты указывают на то, что в полом ферромагнитном роторе ПЭМП существенные внутренние механические напряжения (превышающие точность измерений) могут возникать при величинах крутящего момента более 10000 Нм.

В ПЭМП для перерабатывающих технологий, имеющих узел вы-пресовки, осевая нагрузка на упорный узел может составлять более 1000 кН. Такие крутящие моменты и усилия сжатия приводят к значительным изменениям электрофизических свойств массива ротора, что требует обязательного учета при расчетах глубины проникновения электромагнитной волны, аппроксимации кривой намагничивания, а также расчетах параметров и характеристик ПЭМП.

Выводы:

1. Разработанная методика расчета механических напряжений для массивного ферромагнитного ротора ПЭМП позволяет вести оценку возникающих внутренних механических напряжений в сечениях и слоях при распределенных по поверхности крутящих моментах.

2. Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление функциональных зависимостей электрических и магнитных характеристик ротора от возникающих внутренних механических напряжений с целью использования их в проектных расчетах и исследованиях ПЭМП при квазистатических и динамических режимах работы.

Библиографический список

1. *Нейман Л.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах/ Л. Р Нейман – Л.: Госэнергоиздат, 1949. - 190с.*
2. *Herman B. Rozruszniki wiropadowe o rdzemiach wielokrotnych / B. Herman //Komunikat. IUE. PWr/1975, № 58.*
3. *Turowski J. Elektrodynamika techniczna. WNT Warszawa, 1968.*
4. *Заблодский Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения : Монография/ Н.Н. Заблодский.- Алчевск: ДонГТУ, 2008. - 295с.*
5. *Федосеев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов/ В.И. Фадеев. – М.: Наука, 1967.*
6. *Лившиц В.Г. Физические свойства сплавов/ В.Г.Лившиц. –М: Металлургиздат, 1946. - 320с.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Лушиком В.Д.