УДК 621. 313: 621. 318. 123

Н.Н. ЗАБЛОДСКИЙ, д-р техн. наук, проф., ДонГТУ, Алчевск
В.Е. ПЛЮГИН, канд. техн., наук, доц., ДонГТУ, Алчевск
Н.В. ЛУКЬЯНОВ, м.н.с., аспирант, ДонГТУ, Алчевск

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО РОТОРА ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Main states of a technique that accounts influence of internal stress on electromagnetic parameters and characteristics in a screw multifunctional electromechanical converter are presented. Characteristic zones of the stress influence are defined in active parts of the converter.

Определены характерные зоны влияния механических напряжений в активных частях, а также представлены основные положения методики учета влияния внутренних напряжений на электромагнитные параметры и характеристики шнекового полифункционального электромеханического преобразователя (ПЭМП).

Визначено характерні зони впливу механічних напруг в активних частинах, а також представлені основні положення методики обліку впливу внутрішніх напружень на електромагнітні параметри та характеристики шнекового поліфункціонального електромеханічного перетворювача (ПЕМП).

Введение. С появлением нового класса полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) технологического назначения [1] проблема точного определения параметров, мощностей и характеристик при проникновении двухсторонней плоской и цилиндрической волн стоит очень остро.

Повышение эффективности, экономичности и универсальности устройств, которые обеспечивают обработку указанных материалов, задача для обеспечения конкурентоспособности перерабатывающих отраслей.

Одной из основных проблем теоретических расчетов динамических режимов электромеханических устройств является точное знание изменений физических свойств и параметров активных частей. Как правило, учет таких изменений производиться лишь для температурных воздействий. Анализ электромагнитного поля в массивных фер-

ромагнитных частях электрических машин является сложной задачей, из-за нелинейности характеристик намагничивания. С ростом удельных электромагнитных нагрузок высокоиспользованных машин, при которых усиливаются не только тепловые, но магнетострикционные явления, поиск новых методов теоретического и экспериментального определения изменения параметров и характеристик электромеханических преобразователей энергии является актуальной задачей.

Анализ предыдущих исследований. Исследованию влияния упругих и пластических деформаций на магнитные параметры изделий из конструкционных и электротехнических сталей посвящено множество работ [2-4]. Однако задачи прогнозирования и контроля изменения параметров и характеристик электромеханических устройств при напряженно-деформированном состоянии активных элементов, до сих пор не решались. Учет влияния механических напряжений целесообразен для некоторых современных типов асинхронных двигателей-приводов угледобывающих механизмов, имеющих структуру ротора, предполагающую ответвление магнитного потока в массив вала.

Безусловно, такого рода исследования должны выполняться поэтапно, включая в алгоритм следующие стадии: определение реально действующих механических, тепловых и электромагнитных нагрузок; установление функциональной связи воздействий и физических свойств материалов активных частей; системный подход в оценке комплексного воздействия на параметры и характеристики электромеханических преобразователей.

Целью данной работы является создание модели для определения степени влияния упругих и пластических деформаций на магнитные и электрические параметры электротехнических установок, на примере полого ферромагнитного ротора ПЭМП.

Материал и результаты исследований. В качестве объекта исследования выбран ротор двухмодульного шнекового ПЭМП, имеющий следующую систему нагружения: равномерно распределенные по поверхности полого цилиндра пары сил воздействия транспортируемого материала; равномерно распределенные по поверхности активных зон цилиндра (ротора) пара электромагнитных сил от взаимодействия с двигательным (ДМ) и тормозным (ТМ) модулем.

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 76 кВт 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 Нм (для ДМ) и $M_{эм2}$=400 Нм (для ТМ).

Соответствующие интенсивности:

$$m_н = \frac{M_н}{\pi DL}; \quad m_1 = \frac{M_{эм1}}{\pi Dl_2} - \frac{M_н}{\pi DL}; \quad m_2 = \frac{M_{эм2}}{\pi Dl_4} + \frac{M_н}{\pi DL}, \qquad (1)$$

где $M_н$, $M_{эм1}$, $M_{эм2}$ – нагрузочный и электромагнитные моменты; L – общая длина ротора; l_2, l_4 – участки активных зон электромагнитных модулей. $M_н$ определяется из условия равновесия на определенной частоте вращения цилиндра-ротора.

На рис. 1 представлены расчетно-конструктивная схема, эпюра моментов кручения и экспериментального установленная термограмма вдоль оси ротора, указывающее на зоны интенсивного комплексного воздействия в сечениях ферромагнитного полого ротора.

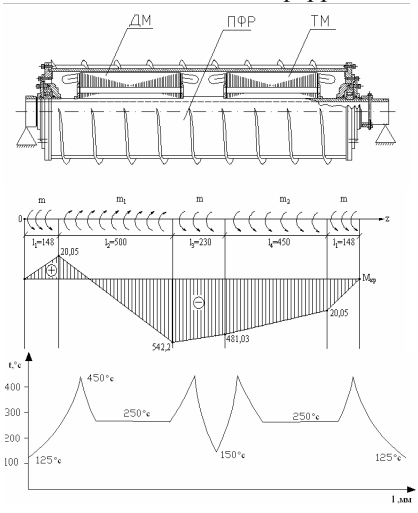

Рис. 1. Расчетно-конструктивная схема, эпюра крутящих моментов и термограмма полого ферромагнитного ротора.

При заданной схеме нагружения цилиндра – ротора возникают касательные напряжения τ в поперечных и напряжения t в цилиндрических и осевых сечениях, распределение которых по объему подчиняются известным зависимостям [5]. В соответствии с эпюрой крутящих моментов в характерных сечениях определяются максимальные касательные напряжения. Однако, существенным отличием от известных расчетных методик являются условия, при которых касательные напряжения формируются не только в соответствии с линейным законом распределения напряжений по слоям, но и с нелинейным законом распределения действующих электромагнитных сил. В первом приближении принимаем линейный закон распределения и определяем возникающие при этом перемещения V в слоях по касательной к дуге круга, показанные на рис. 2, из уравнения

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

а возникающие касательные напряжения τ, *t* и углы сдвига плоскости поперечного сечения из выражений

$$\tau = G\frac{\partial V}{\partial z}\,,$$
$$t = -G(\frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r})\,, \qquad (3)$$
$$\gamma_1 = \frac{\partial \mathrm{V}}{\partial z}\,,\ \gamma_2 = \frac{\partial \mathrm{V}}{\partial \mathrm{r}} - \frac{V}{r}$$

где *G* – модуль сдвига или модуль упругости второго рода.

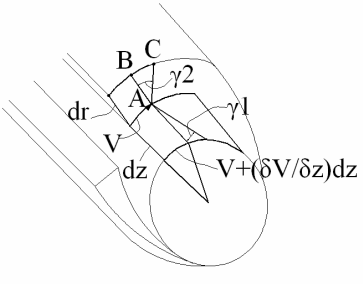

Рис. 2. Расчетная схема перемещений в слоях при скручивающем моменте.

Для экспериментального определения электромагнитных параметров и характеристик был выбран объект наиболее приближенный и повторяющий физические процессы, протекающие в массивном роторе промышленного образца шнекового ПЭМП. Труба тонкостенная (Ст. 3) внешним диаметром – 49 мм; толщиной стенки – 3 мм; длиной – 14,5 мм.

В начале, была определена предельная механическая прочность образца, вплоть до разрушения, исследования проводились тензометрическими методами, прибором СИИТ-2 на универсальной испытательной машине УМЭ-10ТМ.

Далее был выбран метод, обеспечивающий намагничивание и регулирование до необходимых значений частоты, силы тока и напряжения экспериментального образца, и также собрана измерительная схема (вольтметра, амперметра, фазометра), приведенная на рис 3, позволяющая регистрировать необходимые выходные параметры с объекта. Через трубу пропускали ток частотой 400-1300 Гц, которая является оптимальной для регистрации и в не значительной степени зависят от влияния эффекта вытеснения тока и величины индуктивности ротора, измерялось падение напряжения на образце и эталонном сопротивлении величиной 1 Ом и по данным показаниям строился угол (φ) между током и напряжением протекающим в образце. Для определения индукции и напряженности поля применялась измерительная катушка (пояс Роговского), данные величины фиксировались феррометром Ф 5063.

В ПЭМП, где активные подвижные части испытывают одновременно комбинированное воздействие нескольких видов нагружения, особо чувствительными и информативными характеристиками, свидетельствующими о физическом состоянии исследуемого объекта – полого ферромагнитного ротора – являются относительная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила и удельная электропроводность. По данным величинам можно судить о химическом составе материала, температуре и механических напряжениях, возникающих в результате циклических нагрузок активных вращающихся частей машины. Электромагнитные методы – одно из перспективных направлений для оценки напряжений в активных, подвижных элементах.

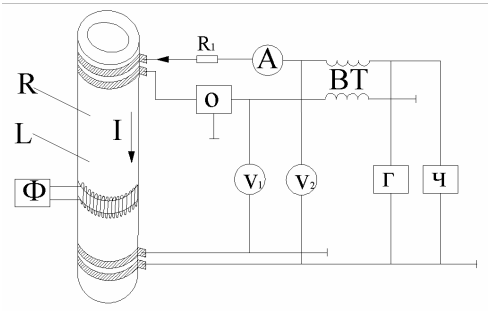

Рис. 3. Схема для измерения магнитной проницаемости и удельной электропроводности методом вольтметра-амперметра.

Существенное влияние на намагничивание ПФР оказывают механические напряжения возникающие в процессе сушки и транспортировки материала, ротор может испытывать сжимающие усилия, обусловленные "проталкиванием" материала по рабочей зоне вдоль оси шнека.

Предварительные расчеты указывают на то, что в полом ферромагнитном роторе ПЭМП существенные внутренние механические напряжения – напряжения сжатия – возникают при больших осевых нагрузках (более 500 кН), например, в зонах выпресовки шнековых смесителей. Наконец, механические напряжения могут возникать из-за резкого перепада температур массива ротора вдоль оси. Перечисленные внутренние напряжения будут существовать в динамических и квазиустановившихся режимах работы ПЭМП.

В качестве исходной модели для рассмотрения процессов изменения магнитного состояния ферромагнитного ротора ПЭМП при воздействии механических напряжений может быть взята модель Прейзаха, где ферромагнетик рассматривается как преобразователь, вход-выход которого связан через двойное интегрирование функции Прейзаха.

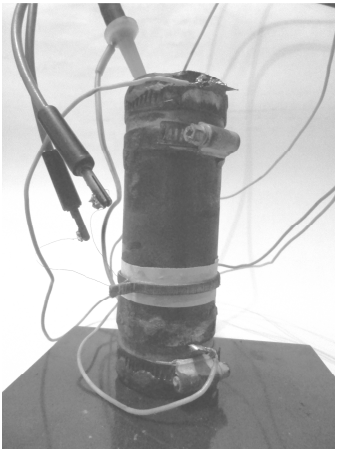

Рис. 4. Макет полого ферромагнитного ротора для определения электромагнитных параметров.

Данные осевые напряжения характерны для промышленных экструдеров [6], которые является сходными с нагрузками, возникающими в массиве ротора ПЭМП шнекового типа, данный факт и исследование в целом создает предпосылки для выявления, разработки и создания новых эволюционных видов полифункциональных электромеханических преобразователей.

Выводы. Предложенная методика позволяет установить характерные зоны влияния механических напряжений на физические свойства массива ротора-шнека и формировать методологию исследований параметров и характеристик, а в дальнейшем проводить проектирование устройств с учетом механических, электромагнитных и тепловых, комплексных воздействий.

Список литературы: **1**. *Заблодский Н.Н.* Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: Монография / *Н.Н. Заблодский*. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 295 с. **2**. *Лившиц В.Г.* Физические свойства сплавов / *В.Г. Лившиц*. – М: Металлургиздат, 1946. – 320 с. **3**. *Михеев М.Н.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / *М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов*, – М.: Наука, 1993. – 252 с. **4**. *Рейнбот Г.* Магнитные материалы и их применение. Пер. с нем. Под ред. А.А. Преображенского. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с. **5**. *Федосеев В.И.* Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов / *В.И. Федосеев*. М.: Наука, 1967. – 210 с. **6**. *Klemens Kolgrüber*. Co-Rotating Twin-Screw Extruders. – Munich: Carl Hanser Verlag, 2008. – 354 с.

Поступила в редколлегию 13.12.2011
Рецензент д.т.н., проф. Лупиков В.С.