

*Н.Н. Заблодский, д-р техн. наук, А.П. Овчар, канд. техн. наук, В.А. Квасов
(Украина, Алчевск, Донбасский государственный технический университет)*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КАК ТЕПЛООБМЕННОЙ СИСТЕМЫ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Введение

Проблема создания энергосберегающих технологий переработки сырья в нефтехимической, горнодобывающей и других отраслях промышленности стала особенно острой в связи с ростом цен на энергоносители и возникающей по этой причине нецелесообразности эксплуатации энергоемких комплексов старого образца. В соответствии с энергетической стратегией Украины до 2030 года предусмотрено проведение комплекса научных изысканий и ОКР по разработке новых энергосберегающих типов оборудования и технологий.

Разумной альтернативой традиционным комплексам, состоящим из отдельно сформированных единиц оборудования, могут стать полифункциональные электротехнические комплексы технологического назначения на базе полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) с использованием диссипативной энергии [1,2]. Это новый класс преобразователей энергии с интеграцией функциональных свойств и конструктивным совмещением электропривода и технологических звеньев [3]. Одной из проблем при создании таких устройств является координация процессов преобразования электрической энергии в механическую и тепловую при условии максимального использования тепла джоулевых потерь.

Создание ПЭМП и энергосберегающих технологий на их основе базируется на идее совмещения в одном электромеханическом устройстве одновременно нагревательных, транспортирующих и смесительных (турбулентноформирующих) функций. При этом полый ферромагнитный ротор охлаждается сырьем, которое перерабатывается. Сложность описания взаимосвязанных тепловых, электромагнитных и механических процессов, необходимость координации потоков энергии, а также наличие нетрадиционных для современных асинхронных машин многомодульной структуры и режимов работы, таких как длительная "стоянка под током", работа при больших скольжениях, динамические режимы форсирования, требуют глубоких теоретических и экспериментальных исследований. Известна комплексная математическая модель, позволяющая вести такие исследования в расчетном сечении активной части ПЭМП. Вместе с тем, достаточно сложная система тепловых связей, неоднородность теплообменной структуры вдоль оси ротора и различие в коэффициентах теплоотдачи вдоль его окружности, необходимость интеграции тепловых потоков в ряде случаев входит в противоречие с существующей идеологией энергетической оценки преобразования энергии и формирования систе-

мы охлаждения. Разработка ПЭМП с заданными свойствами – актуальная проблема при создании энергоресурсосберегающих технологий.

Анализ исследований и публикаций

Анализ традиционных методик исследований электромеханических преобразователей энергии, в том числе с массивным ротором, показывает, что учет температурных изменений в их активном объеме сводится к пересчету активных сопротивлений электрических контуров на рабочую температуру квазиустановившегося режима, которая не превышает класс нагревостойкости изоляционной структуры преобразователя [4,5]. ПЭМП следует рассматривать как теплообменную систему с внутренними источниками тепловой энергии, в которой ведется поиск оптимальной структуры, обеспечивающей не только допустимые уровни температур электрической изоляции в соответствии с классом их нагревостойкости, но и максимальный отбор тепловой энергии от узлов ПЭМП с последующей интеграцией и направлением ее в зону переработки сырья.

Целью данной работы является составление математической модели ПЭМП как теплообменной системы с внутренними источниками тепловой энергии.

Материал и результаты исследований

В качестве объекта исследования взят наиболее перспективный тип преобразователя – шнековый ПЭМП, который предназначен для сушки и транспортировки угольных концентратов и шламов на центральных обогатительных фабриках. Его конструктивно-технологическая схема представлена на рис 1.

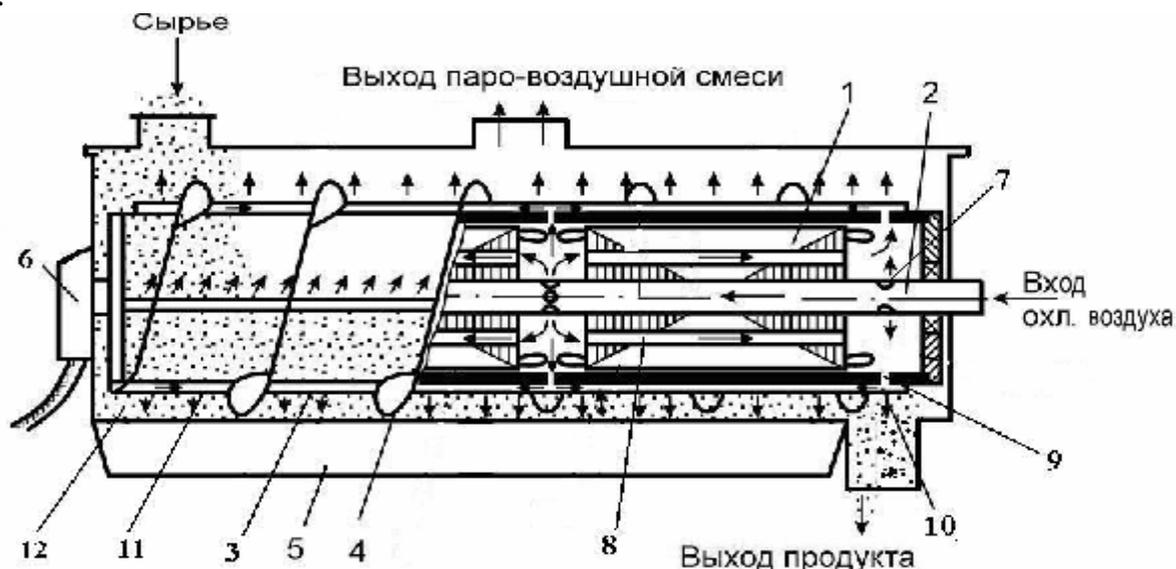


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема шнекового ПЭМП

На этой схеме обозначены: 1 – статор двигательного (тормозного) модуля; 2 – полый неподвижный вал; 3 – внешний ротор–шнек; 4 – днище шнека; 5 – корпус; 6 – ввод питающего напряжения; 7 – радиальные каналы полого вала; 8

– аксиальные каналы статора двигательного (тормозного) модуля; 9 – радиальные каналы ротора-шнека; 10 – аксиальные каналы ротора-шнека; 11 – отверстия в аксиальных каналах ротора-шнека. 12 – нагрузочно-охлаждающая среда (сырье).

В пределах технологического цикла воздушный поток, входящий в полый вал ПЭМП под действием нагнетательного вентилятора, первоначально через каналы 7 попадает в межстаторную зону и зоны лобовых частей, далее поток разделяется на несколько: одни, проходя через аксиальные каналы статоров 8, отбирают диссипативную составляющую энергии активных частей модулей ПЭМП; другие, смешиваясь с потоками, которые выходят из аксиальных каналов статоров, омывают лобовые части и попадают в радиальные каналы ферромагнитного ротора 9; в аксиальных каналах ферромагнитного ротора 10 происходит смешивание всех потоков и через отверстия в аксиальных каналах ротора 11 под давлением воздух попадает в нагрузочно-охлаждающую среду (перерабатываемый материал) 12, находящийся в непосредственном контакте с полым ферромагнитным ротором, передавая ему тепловую энергию, отобранную от всех узлов ПЭМП [6].

Используя эквивалентную схему замещения вентиляционной сети для ПЭМП, приведенную в [6], могут быть вычислены следующие величины: потери давления в отдельных ветвях Δp_i и аэродинамические сопротивления отдельных ветвей Z_i .

В [7] изложены основные принципы интеграции тепловых потоков в ПЭМП, в соответствии, с которыми следует предварительно распределить тепловые мощности (горячие утилиты) между активными частями, установить ориентацию градиентов температур, исключить образование "холодных зон", а также произвести разбивку потоков тепломассообмена на "горячие" и "холодные" потоки. На рис. 2 показан пример такого распределения, где направления потоков нанесены на конструктивную схему ПЭМП.

Практически все внутренние узлы и детали ПЭМП являются источниками горячих утилит, от которых исходят "горячие" потоки. Поток перерабатываемого материала считаем "холодным" потоком, в котором при движении вдоль ротора-шнека происходит увеличение теплосодержания, температуры, а также процесс испарения влаги.

Учитывая сложный характер распределения тепловыделений в обмотках, магнитопроводах и массивном роторе ПЭМП, целесообразным является проведение трехступенчатого расчета теплового процесса. На первой ступени решается общая задача теплопередачи, что позволяет оценить средние значения температур основных частей ПЭМП и распределение тепловых потоков. На втором этапе производится конкретное сопоставление "горячих" и "холодных" тепловых потоков ПЭМП на температурно-энтальпийной плоскости для оценки степени теплообмена между потоками, пинча рекуперации тепловой энергии, а также величины и геометрии теплообменных поверхностей. На третьем этапе в рамках специальных задач уточняется распределение температуры в направлении преобладающих тепловых потоков и утечек [7].

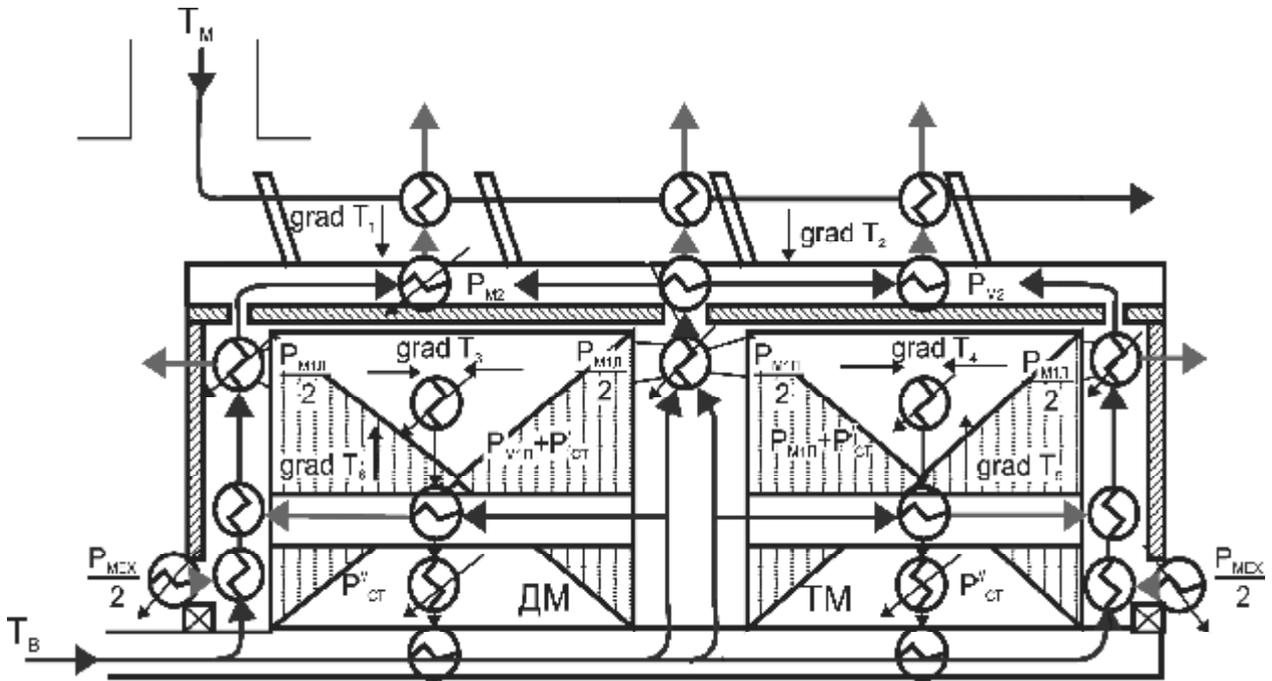


Рис 2. Схема преимущественных направлений "холодных" и "горячих" потоков ПЭМП

Расчет эквивалентной тепловой схемы замещения ПЭМП, приведенной в [7], позволяет установить средние значения превышений температур элементов и величины тепловых потоков между элементами ЭТМП: $Q_{ij} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_j}{R_{ij}}$, где Q_{ij} – тепловой поток между элементами схемы замещения, Вт; $\Delta T_i, \Delta T_j$ – средние температуры этих элементов, °С; R_{ij} – тепловое сопротивление между элементами схемы замещения, °С/Вт.

Используя эквивалентную вентиляционную и тепловую схемы замещения ПЭМП, предложенные в [6,7], может быть составлена математическая модель ПЭМП как теплообменной системы с внутренними источниками тепловой энергии методом тепловых балансов.

Расчет теплообмена в ПЭМП методом тепловых балансов основан на разделении его на ряд участков и составлении для каждого участка уравнений энергетического баланса. Такой метод позволяет учесть изменение коэффициента теплоотдачи от участков ПЭМП к охлаждаемому воздуху (по пути движения воздуха) и изменение температуры воздуха.

Выбор граничных условий обусловлен особенностями системы вентиляции ПЭМП. При построении математической модели будем предполагать, что основная теплопередача в окружающую среду выделившейся в активных элементах ПЭМП тепловой энергии осуществляется путем конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и потоком охлаждающего воздуха. Такой теплообмен происходит в соответствии с законом Ньютона–Рихмана, а на соответствующей границе задается граничное условие третьего рода [8]:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{F_1, F_2, F_3} = -\frac{\bar{\alpha}}{l}(t - t_v), \quad (1)$$

где $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи; t_v – температура охлаждающего воздуха.

Граничное условие (1) задается на верхней части внешней границы ротора F_1 , на внутренней поверхности полого вала статора F_2 и на поверхностях F_3 аксиальных вентиляционных каналов, выполненных в сердечнике статора. Теплообмен на нижней части поверхности ротора F_1' , которая соприкасается с транспортируемым сыпучим материалом, имеет сложную физическую природу. С физической точки зрения наиболее адекватным является предположение о передаче всех выделившихся в нижней половине ротора джоулевых потерь сыпучему материалу в виде теплового потока через поверхность F_1' . Этому предположению соответствует граничное условие второго рода, которое задает среднюю величину теплового потока на границе расчетной области F_1' :

$$q|_{G_1'} = \frac{1}{R_{2H} S'} \int Q ds = \frac{1}{R_{2H} S'} \int [J_z^2 / (\gamma(\gamma)) ds, \quad (2)$$

где R_{2H} – наружный радиус ротора; S' – область интегрирования.

Такое условие часто применяется при расчетах высокотемпературных печей. Условие (2) также обуславливает взаимосвязь электромагнитной и тепловой задач.

Система уравнений для каждого участка имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_i - \bar{\alpha}_i \cdot F_i (\bar{t}_i - \bar{t}_v) = Q_{i+1}; \\ t_{vi} = t_{v0} - \frac{\bar{\alpha}_i \cdot F_i}{G \cdot c_p \cdot c} (\bar{t}_i - \bar{t}_{vi}); \\ \bar{t}_{vi} = (t_{v0} + t_{vi}) \cdot 0,5; \\ \bar{t}_i = (t_i + t_{i+1}) \cdot 0,5; \\ Q_{i+1} = l \cdot f \cdot m_i (\bar{t}_{i+1} - \bar{t}_{vi}), \end{array} \right. \quad (3)$$

где Q_i, Q_{i+1} – соответственно количество теплоты, поступающее и выходящее из i -го участка ПЭМП; α_i – коэффициент теплоотдачи на i -ом участке; F_i – поверхность теплообмена; t_i, t_{i+1} – температура участка в начале и в конце; t_{v0}, t_{vi} – температура воздуха в конце и начале участка (по течению воздуха); \bar{t}_v, \bar{t}_i – средние температуры воздуха и участка; l – теплопроводность участка; f_i – поперечное сечение i -го участка; G, c_p – соответственно расход и теплоемкость воздуха.

Для решения системы уравнений (3) могут быть использованы численные методы решения уравнений. При условии разбиения ПЭМП на такие участки, в которых можно допустить, что теплопроводность участка l_i и коэффициент теплоотдачи α_i остаются постоянными.

Необходимым условием при решении математической модели является то, чтобы температура воздуха, проходящего через i -ый участок была меньше чем температура участка ($t_v < t_i$), т.е. происходил постоянный рост энтальпии воздуха, интеграции тепловой энергии и направление ее в зону перерабатываемого материала. В противном случае, необходимо вносить изменения в конструкцию характерного участка ПЭМП.

Коэффициент теплоотдачи к воздуху, охлаждающему ПЭМП, определяется скоростью воздушного потока и параметрами воздуха и может быть рассчитан по известным критериальным уравнениям.

Выводы

1. Предложенная математическая модель для исследования тепловых процессов полифункциональных электромеханических преобразователей технологического назначения является частью комплекса моделей, направленных не только на оценку соответствия температурного режима принятым классам нагревостойкости деталей и узлов, но и на интеграцию тепловой энергии как полезной компоненты выходной мощности ПЭМП.

2. Дальнейшие направления исследований должны быть ориентированы на детальное изучение инерционных свойств активных частей ПЭМП и неравномерности тепловыделений в массивном роторе ПЭМП, с учетом теплообмена между конструктивными элементами ПЭМП и охлаждающим агентом, с возможностью создания оптимальной структуры ПЭМП для достижения максимальной рекуперации энергии в его теплообменной системе.

Список литературы

1. Пат. України 39226, 7H05B6/10. Заглибний електронагрівач/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко та ін. // Открытия. Изобретения. – 2001. – №5. – С.
2. Пат. України 50242, 7F26B17/18. Шнековий сушильний апарат/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко та ін. // Открытия. Изобретения. – 2005. – №1. – С.
3. Заблодский Н.Н. Формирование динамических и энергетических характеристик электро-тепломеханических преобразователей // Вестн. НТУ "ХПИ". Тем. вып. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2002. - № 12. – Т.2. – С. 432-433.
4. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов /И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496с.
5. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. / Под ред. И.М. Постникова. – К.: Наук. думка. – 1977. – 176 с.
6. Заблодский Н.Н. и др. Вентиляционные расчеты полифункциональных электромеханических преобразователей // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту: Наукові праці КДПУ. – 2008. – Вип. 3/2008, ч. 2. – С. 73-75.

7. Заблодский Н.Н. и др. Расчетные модели при исследованиях тепловых процессов в полифункциональных электромеханических преобразователях технологического назначения // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 2. – С.57-62.
8. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.