

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ШНЕКОВОГО ТИПА

*Наведено математичну модель вентиляційної системи поліфункціонального електромеханічного перетворювача та чисельна реалізація розв'язання рівнянь поля методом кінцевих елементів.*

*Приведена математическая модель вентиляционной системы полифункционального электромеханического преобразователя и численная реализация решения уравнений поля методом конечных элементов.*

### ВВЕДЕНИЕ

В науке и технике постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. К такой системе относится система вентиляции полифункционального электромеханического преобразователя (ПЭМП) шнекового типа.

ПЭМП шнекового типа предназначен для осуществления технологических процессов переработки сыпучих материалов [1, 3] и отличается от традиционных асинхронных машин многомодульной структурой, функциями, системой вентиляции, осуществляющей интеграцию тепловой энергии и перенос ее в область переработки материала.

Моделирование системы вентиляции ПЭМП шнекового типа является актуальной проблемой и может иметь практическое применение не только в области систем охлаждения электрических машин, но и различных вентиляционных, гидродинамических, биоэнергетических системах.

### АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известные результаты исследований вентиляционных систем асинхронных машин [2, 4, 5] основываются на классических вентиляционных схемах замещения и не могут в полной мере быть использованы для описания вентиляционной системы ПЭМП из-за сложности его конструкции и особенностей. В то же время вопрос расчета распределения воздушных потоков в системе вентиляции ПЭМП практически не рассматривался.

Сложность описания вентиляционных и гидродинамических процессов, необходимость координации потоков энергии, а также нетрадиционная для современных асинхронных машин конфигурация вентиляционных каналов и режимы работы нуждаются в глубоких теоретических и экспериментальных исследованиях.

Среди численных методов решения задач в различных областях, получивших наибольшее распространение, ведущее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ), который рассматривается сегодня как способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных производных. Этот метод включается в системы автоматизированного проектирования (САПР), и служит для моделирования механических, тепловых и

электрических задач. Его отличает широкая область применения, инвариантность по отношению к геометрии конструкции и физическим характеристикам материалов, относительная простота учета взаимодействия конструкций с окружающей средой, высокая степень приспособляемости к автоматизации всех этапов расчета [6].

Целью данной работы является моделирование вентиляционной системы ПЭМП шнекового типа и численная реализация решения уравнений поля методом конечных элементов.

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При моделировании вентиляционной системы в данной работе внимание сфокусировано на исследовании движения охлаждающего воздуха во внутреннем объеме ПЭМП, поскольку от правильно построенной и рассчитанной вентиляционной системы зависит эффективность охлаждения характерных узлов и эффективность интеграции всех видов диссипативной энергии (трение в подшипниках, электрические потери в обмотках, дополнительные потери) в зону переработки материала ПЭМП.

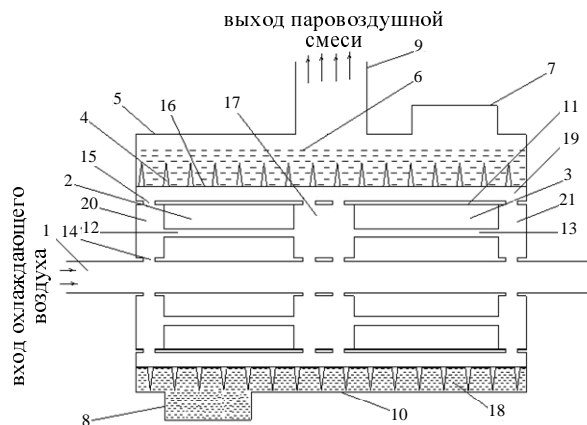


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема вентиляционной системы ПЭМП

Конструктивно-технологическая схема вентиляционной системы шнекового ПЭМП представлена на рис. 1, где были приняты такие обозначения: 1 – полый вал; 2 – пакет статора тормозного модуля (ТМ); 3 – пакет статора двигательного модуля (ДМ); 4 – полый ферромагнитный ротор (ПФР) с винтовой навивкой; 5 – крышка корпуса ПЭМП; 6, 18 – перерабатываемый материал; 7 – загрузочный патрубок;

8 – выгрузочный патрубок; 9 – патрубок для выхода паровоздушной смеси; 10 – днище ПЭМП; 11 – воздушный зазор; 12, 13 – соответственно аксиальные каналы статоров ДМ и ТМ; 14 – радиальные каналы полого вала; 15 – радиальные каналы ПФР; 16 – отверстия форсуночного типа в ПФР; 17 – межмодульное пространство; 19 – аксиальные каналы ПФР; 20, 21 – зоны лобовых частей.

Вентиляционная система ПЭМП моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса [7]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Обобщенные уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot [\eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F}; \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{u}$  – векторное поле скоростей;  $p$  – давление;  $\mathbf{F}$  – поле объемной силы.

Первое уравнение – уравнение движения, второе – уравнение непрерывности для несжимаемых жидкостей и газов [7]. Тензор давления представляет собой силу, которая прикладывается к газу на границе. Вязкий тензор давления  $\tau$  определяется, как:

$$\tau = \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T). \quad (3)$$

Полный тензор давления определяется, как:

$$\sigma = -p\mathbf{I} + \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}$  – матрица идентичности или диагональная матрица единицы.

С помощью этих тензоров давления, можно определить вязкую пограничную силу  $\mathbf{K}$ , как

$$\mathbf{K} = \tau \cdot \mathbf{n} = \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

и полную пограничную силу  $\mathbf{T}$ , как

$$\mathbf{T} = \sigma \cdot \mathbf{n} = (-p \cdot \mathbf{I} + \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) \cdot \mathbf{n},$$

где  $\mathbf{n}$  – внешний нормальный вектор на границе.

Полный тензор давления:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot [-p \cdot \mathbf{I} + \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F}; \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Можно перейти к форме вязкого тензора давления:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot [\eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \cdot (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения Навье-Стокса часто переписываются в безразмерной форме [7]. Для этого вводят переменные  $\mathbf{u}^* = \mathbf{u}/U$ ,  $t^* = t \cdot U/L$ , соответствующий масштаб длины  $L$ , безразмерное давление  $p^*$ , и силу  $F^*$ . Уравнения в безразмерной форме имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} - \nabla \cdot \left( \frac{1}{\text{Re}} (\nabla \mathbf{u}^* + (\nabla \mathbf{u}^*)^T) \right) + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u}^* + \nabla p^* = \mathbf{F}^*, \\ \nabla \cdot \mathbf{u}^* = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где  $\text{Re} = U \cdot L \cdot \rho / \eta$  – число Рейнольдса

Ввиду сложной конфигурации вентиляционной системы ПЭМП, нелинейности физических свойств воздуха решение сформулированной математической модели возможно только численными методами. Практическая реализация двумерной математической модели для продольного разреза ПЭМП выполнена в Comsol Multiphysics 3.2.

Для потока на входе в полый вал ПЭМП выбрано граничное условие в виде параболического скоростного профиля (подобный полностью развитому профилю в ламинарном потоке), где поток является функцией максимальной скорости  $u_{\max}$ . Уравнение такого потока:

$$\mathbf{u} = s \cdot (1-s) \cdot 4 \cdot u_{\max}, \quad (9)$$

где  $s$  – представляет нормированную ширину входа, predetermined параметр в Comsol Multiphysics, который изменяется от 0 до 1 по каждому сегменту границы.

Все выходы потока в модели используют граничное условие – "отток давления". Используя полную форму тензора давления, это граничное условие значит, что полная сила на границе – сила давления  $p_0$  [7]:

$$\mathbf{T} = -p_0 \cdot \mathbf{n}. \quad (10)$$

Кроме того, надо принять условие "без скольжения" на всех поверхностях вентиляционных каналов ПЭМП. Это условие означает, что скорость потока на границе нулевая. Обычно это условие ( $\mathbf{u} = 0$ ) используется для стен [7].

Внутренние границы принимаются как нейтральные. Это означает, что полная или вязкая сила исчезает [7]. Формализованный вид этих условий:  $\mathbf{T} = 0$ ,  $\mathbf{K} = 0$ .

Вычислительный эксперимент проводился при следующих заданных параметрах охлаждающего воздуха:  $u_{\max} = 32$  м/с (расход нагнетающего вентилятора  $G = 1200$  м<sup>3</sup>/час). – скорость на входе в полый вал;  $\eta = 1,79 \cdot 10^{-5}$  Па·сек – динамическая вязкость;  $\rho = 1,205$  кг/м<sup>3</sup> – плотность.

В качестве исходных данных принято:

- сердечник статора двигательного модуля длиной  $L_1 = 500$  мм имеет 14 аксиальных каналов диаметром  $D_{в.д} = 30$  мм;
- сердечник статора тормозного модуля длиной  $L_1 = 450$  мм имеет 14 аксиальных каналов диаметром  $D_{в.т} = 30$  мм;
- общий для обоих модулей полый внешний ротор длиной 1436 мм и диаметром  $D = 398$  мм выполнен из стали марки Ст.3, имеет 6 аксиальных каналов, в виде равнобедренных треугольников с размером стенки  $a = 50$  мм, и 30 отверстий в аксиальных каналах форсуночного типа диаметром 5 мм. Винтовая навивка ПФР имеет 16 витков с высотой лопатки 80 мм;
- воздушный зазор между статором и ротором для каждого модуля  $\delta = 2$  мм;
- общий для обоих модулей полый вал имеет длину  $L = 1832$  мм и внутренний диаметр  $D = 120$  мм;
- выходной патрубок для паровоздушной смеси имеет диаметр  $D_{в.п} = 250$  мм.

Так как двумерная модель позволяет изобразить только по два аксиальных канала ДМ и ТМ, а их по 14 в каждом статоре, в ходе моделирования расход охлаждающего воздуха на границе каждого канала делился на семь. Аналогично в аксиальных каналах ПФР расход делился на 3.

Немаловажную роль в вентиляционной системе ПЭМП играет перерабатываемый материал, который представлен в данной статье в виде пористой структуры, причем плотность материала в нижней части рабочей камеры выше, что обусловлено конструктивными особенностями ПЭМП. Влияние неравномерного распределения материала на систему вентиляции показывают картины распределения скорости охлаждающего воздуха во внутреннем объеме ПЭМП, которые представлены ниже.

На рис. 2 представлен вариант сетки конечных элементов, обеспечивающий необходимую точность моделирования.

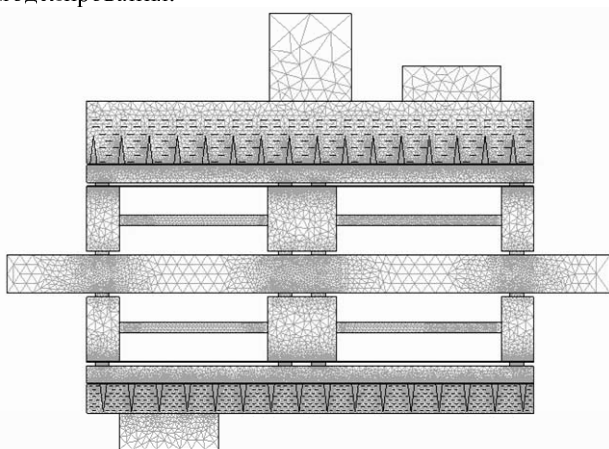


Рис. 2. Расчетная сетка конечных элементов

На рис. 3 изображена картина распределения скорости охлаждающего воздуха во внутреннем объеме ПЭМП, на рис. 4 – векторное поле скорости охлаждающего воздуха в ПЭМП в виде линий потока, на рис. 5 – векторное поле скорости охлаждающего воздуха в ПЭМП в виде изолиний.

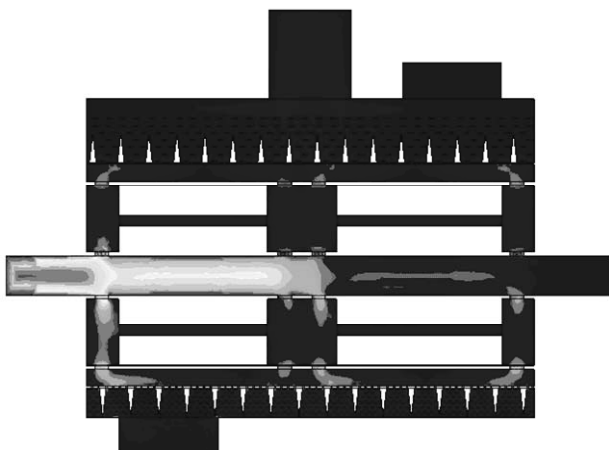


Рис. 3. Картина распределения скорости охлаждающего воздуха в ПЭМП

Результаты моделирования очень наглядно показывают, каким образом происходит распространение воздуха в вентиляционной системе ПЭМП. Изменяя

параметры визуализации, мы можем добиться интересующего нас изображения, наиболее полно раскрывающего весь процесс.

Двумерная модель вентиляции ПЭМП формирует область течения с учетом всех имеющихся в данном варианте геометрических особенностей. Анализируя поле скоростей и давлений в различных сечениях, как в отдельном канале, так и всего вентиляционного тракта в целом, можно обоснованно делать заключение о физических основах эффективности конструкции ПЭМП. Это является одним из существенных преимуществ описанного подхода к исследованию вентиляционных систем, т.к. ранее провести подобное всестороннее исследование можно было только с помощью длительного, дорогостоящего и технически сложного аэродинамического эксперимента. Кроме того, в некоторых местах вентиляционного тракта (например, вращающийся аксиальный канал ПФР) параметры потока труднодоступны для измерения.

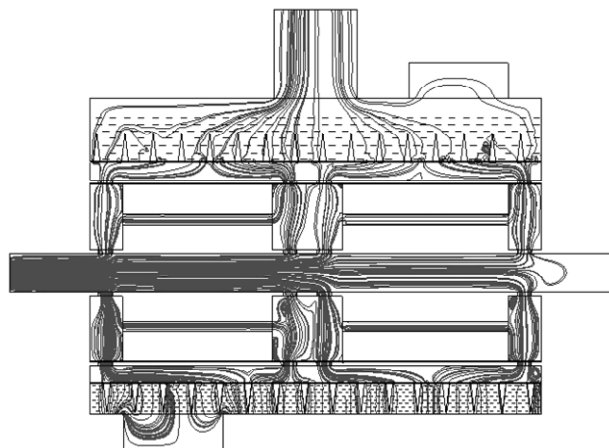


Рис. 4. Векторное поле скорости охлаждающего воздуха в ПЭМП в виде линий потока

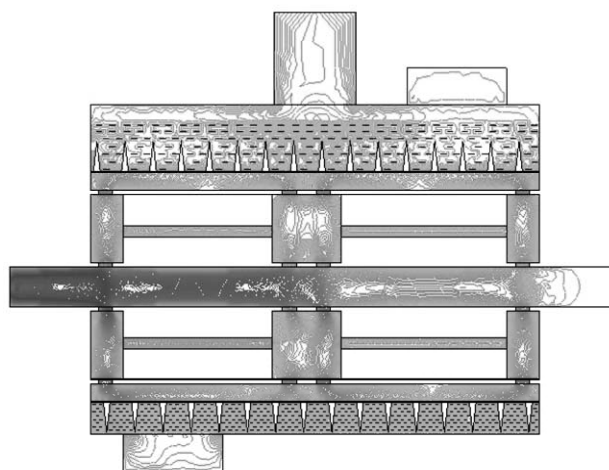


Рис. 5. Векторное поле скорости охлаждающего воздуха в ПЭМП в виде изолиний

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение численного моделирования течения воздушного потока для расчета вентиляции ПЭМП следует признать перспективным. В отличие

от использования полуэмпирических инженерных методик расчета вентиляции описанный подход позволяет совершенствовать существующую вентиляционную систему на основе анализа качественной картины движения потока в воздушном тракте преобразователя, а также получать локальные и интегральные характеристики потока.

Расчет вентиляционной системы ПЭМП методом численного моделирования в трехмерной постановке имел бы значительно большую научную ценность. Однако такие расчеты пока не проводились ввиду их значительной ресурсоемкости и, вероятно, даже отсутствия вычислительных мощностей, на которых подобные расчеты можно осуществить за разумное время.

### ВЫВОДЫ

1. Создана двумерная модель вентиляционной системы ПЭМП и получены картины распределения охлаждающего воздуха в продольном сечении ПЭМП.

2. Разработанная полевая методика анализа является универсальной и позволяет получить поле скоростей и давлений в различных сечениях, как в отдельном канале ПЭМП, так и во всем вентиляционном тракте и может быть распространена на другие вентиляционные, гидродинамические, биоэнергетические системы.

3. Дальнейшие исследования должны быть направлены на более детальные исследования вентиляционной системы с помощью численного трехмерного моделирования, учитывая процессы теплообмена, в ПЭМП.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Заблодский Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения. – Монография. – Алчевск: ДонГТУ. – 2008. – 340 с.
2. Пат. 50242 Україна. МКИ 7F26B 17/18. Шнековый сушильный аппарат / Заблодський М.М., Захарченко П.І., Шинкаренко В.Ф., Плюгін В.Є. та інші. – Бюл. № 1. – 2005.3.

Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974 – 383 с.

4. Постников И.М. Проектирование электрических машин: Уч. пособие для энергетических специальностей вузов СССР. – 2-е изд., перер. и доп. – К.: Гостехиздат, 1960. – 910 с.

5. Алексеев А.Е. Конструкции электрических машин. – М. – А.: Госэнергоиздат, 1958. – 425с.

6. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. С12 Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц.- М.: Мир, 1989.-190 с, ил. ISBN 5-03-000488-2

7. Gresho P.M, and Sani R.L., Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, NY, 2000.

Поступила 30.08.2009

*Заблодский Николай Николаевич*, д.т.н., проф.,

E-mail: info@dmmi.edu.ua,

тел. (06442) 2-30-73,

*Квасов Виктор Алексеевич*,

E-mail: kvas\_in@mail.ru, тел. (06442) 2-22-22,

*Лукьянов Николай Васильевич*,

E-mail: nik\_lykuanov@mail.ru,

тел. (06442) 2-22-22,

кафедра "Электрические машины и аппараты"

*Смагина Ирина Алексеевна*

кафедра высшей математики,

тел. (06442) 2-79-60

Донбасский государственный технический университет,  
Украина, 94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16

*N.N. Zablodskiy, V.A. Kvasov, I.A. Smagina, N.V. Lukyanov*

### **Modelling of a ventilating system of a multifunctional screw-type electromechanical converter**

A mathematical model of a ventilating system of a multifunctional electromechanical converter is developed, FEM numerical realization of a field equations solution presented.

**Key words - ventilating system, numerical modeling, multifunctional electromechanical converter, field equations**