

*Канд. техн. наук, доцент Заблодский Н. Н.
аспирант Филатов М. А.
аспирант Овчаров А. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Наведені результати теоретичних досліджень, отримані залежності щодо впливу термомеханічних змін у конструкції на параметри та характеристики електротепломеханічних перетворювачів енергії.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. 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 электротепломеханических преобразователей (ЭТМП) с использованием диссипативной энергии [1,2].

Анализ исследований и публикаций. Анализ опубликованных 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 [3,4]. Вместе с тем для ЭТМП, представляющих новый класс электротепломеханических преобразователей, характерны значительные температуры на внешнем массивном роторе (до 300 °С), обусловленные технологическими режимами ис-

пользования и наличием принудительного охлаждения статорных модулей. Температурные изменения в массивном роторе приводят не только к изменению активной проводимости и магнитной проницаемости стали, но и к заметным термомеханическим изменениям [5,6].

Постановка задачи. Выполнить оценку влияния термомеханических изменений в конструкции на параметры и характеристики ЭТМП.

Изложение материала и его результаты. В качестве объекта исследования взят наиболее перспективный тип преобразователя – шнековый ЭТМП, конструктивно-технологическая схема, которого представлена на рисунке 1.

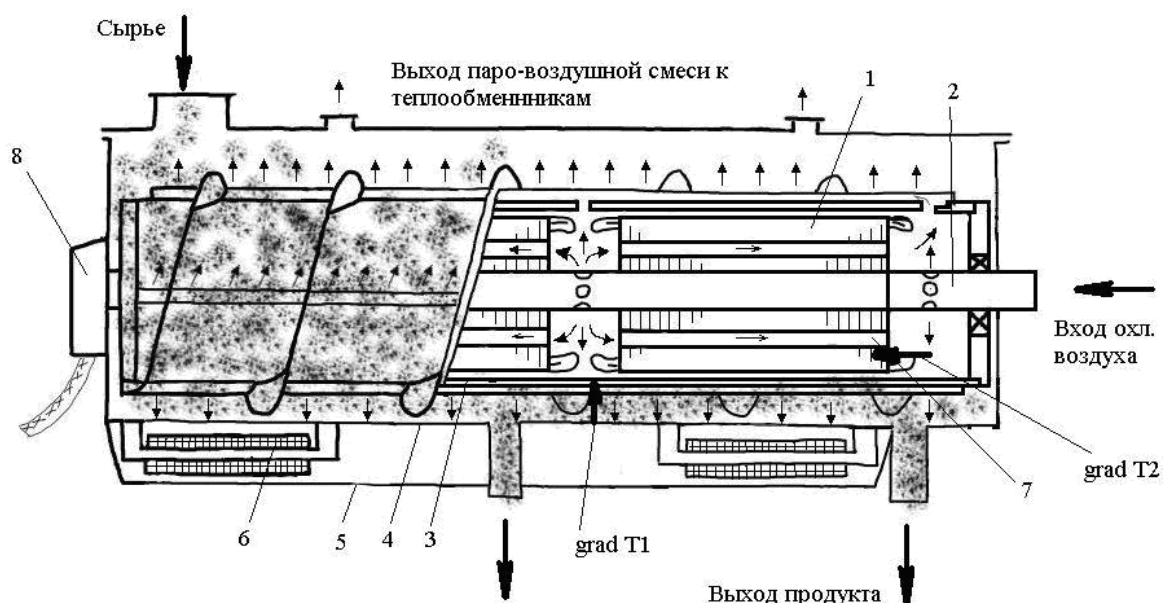


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема шнекового ЭТМП:

- 1- двигательный (тормозной) модуль статора;
- 2- полый неподвижный вал;
- 3- внешний ротор-шнек;
- 4- днище шнека;
- 5- корпус;
- 6- индукторы подогрева днища;
- 7- аксиальные каналы ротора-шнека;
- 8- ввод питающего напряжения;

Работа ЭТМП, предназначенного для сушки и транспортировки угольных концентратов и шламов, связана с повышенной температурой (температура массивного внешнего ротора составляет 300°С, а внутрен-

него двухмодульного статора – 150°C). При таких температурах происходит изменение линейных размеров конструкции по зависимости [5]:

$$l_t = l_0(1 + a \cdot t + b \cdot t^2) \quad (16)$$

где l_0 – первоначальный размер тела; a и b – коэффициенты, определяемые экспериментально (для Ст 3 $a=117 \cdot 10^{-7}$ и $b=4,7 \cdot 10^{-9}$).

Нагрев ротора осуществляется за счет протекания вихревых токов по стальному цилиндру, теплопроводности (от внутреннего слоя к внешнему) и конвекции, но т.к. последние не оказывают существенного влияния на распределение температуры по объему цилиндра, считаем, что происходит равномерный нагрев ротора. Это объясняется тем, что толщина стального цилиндра составляет 12мм, что равно глубине проникновения магнитного поля $\Delta l_p = 5,9 \cdot 10^{-3}$, которое является основным источником нагрева.

В результате расчета были получены изменения линейных размеров: длины ротора $\Delta l_p = 5,9 \cdot 10^{-3}$ м; наружного диаметра витка ротора $\Delta D_2 = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м, внутреннего диаметра ротора – $\Delta D_2 = 1,47 \cdot 10^{-3}$ м – при нагреве ротора до температуры 300°C; длина пакетов статора – $\Delta l_1 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м; наружного диаметра статора – $\Delta d_1 = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м – при нагреве статора до температуры 150°C.

Воздушный зазор не относится к главным размерам ЭТМП, но его по праву необходимо считать третьим основным геометрическим параметром наряду с диаметром расточки статора и активной длиной. Прямо или косвенно величина воздушного зазора влияет на все характеристики и технико-экономические показатели ЭТМП. Вместе с тем, для классических электрических машин вошло в традицию выбирать величину воздушного зазора такой, чтобы она приближалась к минимально допустимой с технологической точки зрения. Для ЭТМП понятие «технологической точки зрения» несколько шире, поскольку включает не только уровень технологии изготовления узлов электрических машин и технических характеристик комплектующих, но и режимные параметры технологического процесса, в котором задействован ЭТМП.

Вследствие разных температур нагрева поверхностей статора и ротора воздушный зазор увеличивается от $\delta_{хол} = 2 \cdot 10^{-3}$ м до

$$\delta_{нагр} = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Величина воздушного зазора непосредственно входит в знаменатели выражений для расчета взаимной индукции между обмоткой ста-

тора двигательного (тормозного) модуля и соответствующей активной зоной массивного ротора, а также коэффициента проводимости дифференциального рассеяния:

$$x_{12} = \omega_1 \cdot L_{12} = \frac{4 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot w_1^2 \cdot k_{об1}}{k_g \cdot \delta_p} \quad (2)$$

$$\lambda_d = \frac{t_z}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi \quad (3)$$

где t_z – зубцовое деление статора;

τ – полюсное деление;

l_δ – активная длина соответствующего модуля;

$w_1, k_{об1}$ – соответственно – число витков и обмоточный коэффициент статорного модуля;

ξ – коэффициент, зависящий от выполнения обмотки, степени раскрытия пазов и влияния вихревых токов.

Таким образом, изменение воздушного зазора, вызванное температурными воздействиями, приводит к уменьшению индуктивного сопротивления взаимоиндукции и индуктивного сопротивления рассеяния статора. Однако в области больших скольжений ($0,8 < s < 1$) влияние изменения величины воздушного зазора на величину сопротивления взаимоиндукции сказывается в меньшей мере.

Для анализа результирующего влияния температурных воздействий на параметры и характеристики ЭТМП воспользуемся выражениями для токов и электромагнитных моментов по Г-образной схеме замещения:

для двигательного модуля (ДМ):

$$\dot{I}_{0Д} = \frac{\dot{U}_1}{R_{1Д} + j \cdot (X_{1Д} + X_{МД})}, \quad (4)$$

$$\dot{I}_{2Д}'' = \frac{\dot{U}_1}{R_{1Д} \cdot C_{1Д} + \frac{R'_{2Д}(1)}{\sqrt{S_{Д} \cdot \dot{I}_{2Д}''}} \cdot C_{1Д}^2 + j \cdot \left[X_{1Д} \cdot C_{1Д} + 0,6 \frac{R'_{2Д}(1)}{\sqrt{S_{Д} \cdot \dot{I}_{2Д}''}} \cdot C_{1Д}^2 \right]}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_{1Д} = \dot{I}_{0Д} + (-\dot{I}_{2Д}''), \quad (6)$$

$$M_D = (\dot{I}_2'')^2 \frac{R'_{2D}(1)}{\sqrt{S_D \cdot \dot{I}_{2D}''}} \cdot C_{1D}^2, \quad (7)$$

для тормозного модуля (ТМ):

$$\dot{I}_{0T} = \frac{\dot{U}_1}{R_{1T} + j \cdot (X_{1T} + X_{MT})}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2T}'' = & \frac{\dot{U}_1}{R_{1T} \cdot C_{1T} - \frac{R'_{2T}(1) \cdot \sqrt{p_D}}{\sqrt{\dot{I}_{2T}'' \cdot [p_T \cdot (1 - S_D) \pm p_D]}} \cdot C_{1T}^2} + \\ & + \frac{\dot{U}_1}{j \cdot \left[X_{1T} \cdot C_{1T} + 0,6 \cdot \frac{R'_{2T}(1) \cdot \sqrt{p_D}}{\sqrt{\dot{I}_{2T}'' \cdot [p_T \cdot (1 - S_D) \pm p_D]}} \cdot C_{1T}^2 \right]} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{I}_{1T} = \dot{I}_{0T} + (-\dot{I}_{2T}''), \quad (10)$$

$$M_T = - \frac{(\dot{I}_{2T}'')^2 \cdot R'_{2T}(1) \cdot C_{1T}^2 \cdot \sqrt{p_D}}{\sqrt{[p_T \cdot (1 - S_D) \pm p_D] \cdot \dot{I}_{2T}''}}, \quad (11)$$

где $R'_{2D}(1)$, $R'_{2T}(1)$ – единичные волновые активные сопротивления массивного ротора соответственно для ДМ и ТМ, расчет которых ведется по [6];

p_D , p_T – число пар полюсов ДМ и ТМ;

S_D – скольжение ДМ;

C_{1T} , C_{1D} – коэффициенты преобразования Т-образной схемы в Г-образную схему замещения ЭТП ($C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_M}$);

R_{1D} , R_{1T} – активные сопротивления статорных обмоток соответственно ДМ и ТМ.

Из рассмотренных выражений (4)-(11) следует, что формирование изменений токов и моментов ДМ и ТМ происходит по достаточно сложным зависимостям. С одной стороны, за счет увеличения температуры активных частей увеличиваются активные сопротивления статоров R_{1D} , R_{1T} и участков массивного ротора $R'_{2D}(1)$, $R'_{2T}(1)$ соответствующих

модулей. С другой стороны, как отмечалось выше, индуктивные сопротивления обмоток статоров ДМ и ТМ уменьшаются за счет температурного роста воздушного зазора.

Нагревание стали ротора вихревыми токами и, частично, тепловым агентом, снимающим тепло с активных частей статоров, ведет к существенному уменьшению его электропроводности. При этом из-за поверхностного эффекта максимумы токов и температуры возникают на внутренней поверхности ротора, а величина электропроводности изменяется по глубине ротора. Это ведет к снижению расчетной амплитуды токов на поверхности ротора на 25...30% и увеличению глубины проникновения токов на 35...45%. В результате при учете всех выше приведенных факторов электромагнитный момент ДМ в диапазоне скольжений $S=0,85...1$ уменьшается на 10...15%. На рис. 2 и рис. 3 представлены соответственно зависимости $M=f(T)$ при $S=1$ и $M=f(S)$ при различных температурных состояниях ротора ЭТМП.

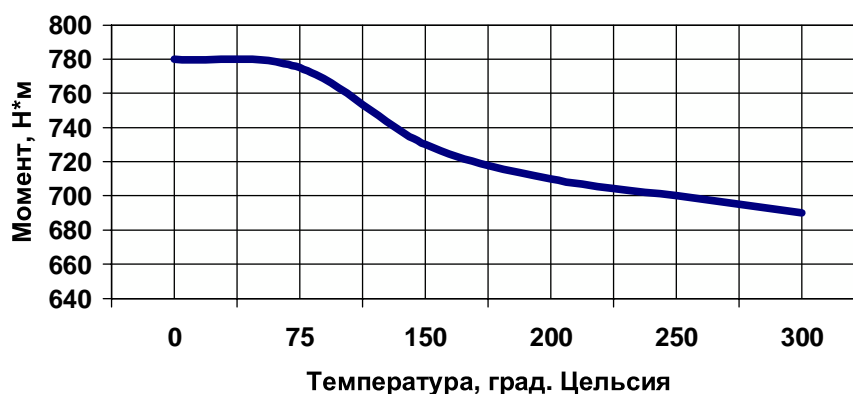


Рисунок 2 – Зависимость $M=f(T)$ двигательного модуля при $S=1$

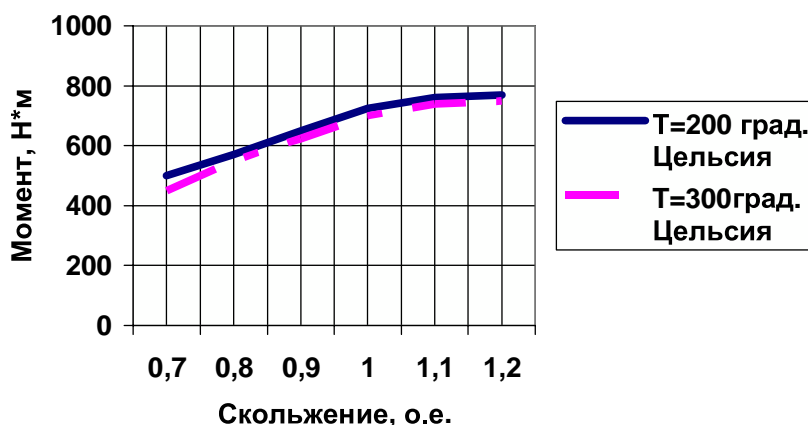


Рисунок 3 – Электромагнитный момент двигательного модуля ЭТМП для различных условий нагрева ротора.

Температурные изменения параметров и характеристик ТМ имеют существенные отличия от ДМ:

- противоположное направление изменения скольжения S_T в сравнении с S_D при колебаниях частоты вращения ротора;

- замена знака в знаменателе выражения (9);

- более существенное влияние параметра X_T .

Указанные факты ведут к определённой стабилизации модуля вторичного тока ротора и электромагнитного момента.

Полученные расчетные значения хорошо согласуются с испытаниями экспериментального образца шнекового ЭТМП.

В данной работе выполнены расчеты ротора и статора на прогиб от силы тяжести и от действия сил магнитного притяжения в холодном состоянии и при нагреве до рабочих температур. Методика расчета отличается от изложенной в [3] тем, что отсутствует расчет прогиба под действием сил кручения, вследствие того, что сам ротор является исполнительным механизмом, а статор не вращается. Расчет прогиба статора произведен, исходя из приведенной силы тяжести, т.к. ЭТМП имеет два пакета статора и их центры тяжести разнесены по длине вала. Суммарный прогиб ротора составляет $f_{рхол} = 2.635$ мкм (0.13% от величины воздушного зазора) и $f_{рнагр} = 2.643$ мкм (0.11% от величины воздушного зазора), статора - $f_{схол} = 31,24$ мкм (1.6% от величины воздушного зазора) и $f_{снагр} = 30.83$ мкм (1.29% от величины воздушного зазора), в холодном и нагретом состоянии соответственно. Причем прогибы, как ротора, так и статора под действием силы тяжести равны как в холодном, так и нагретом состоянии, т.к. при нагреве тело изменяет линейные размеры, объем и плотность, вследствие чего масса остается неизменной. Прогибы от магнитного притяжения соответствуют $f_{рмхол} = 2.2619$ мкм и $f_{рмнагр} = 2.2699$ мкм – для ротора, $f_{смхол} = 17.94$ мкм и $f_{смнагр} = 17.56$ мкм для статора. Увеличение прогиба ротора под действием сил магнитного притяжения в нагретом состоянии объясняется увеличением линейных размеров ротора, причем вследствие разных температур статора и ротора эта сила меньше, нежели при одинаковых температурах, что объясняется увеличением воздушного зазора и, в свою очередь, объясняет уменьшение прогиба статора под действием сил магнитного притяжения в нагретом состоянии.

При нагреве происходит увеличение момента инерции и соответственно, динамического момента, что приводит к увеличению времени разгона до установившейся скорости, но т.к. время разгона составляет 0.2 с, то этот фактор можно не учитывать. ($M_{дохол} = 2.52$ Нм и $M_{днагр} = 2.537$ Нм).

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. При проектировании ЭТМП прогибы статора и ротора можно не учитывать вследствие их малого влияния на работу машины.

2. Вследствие увеличения линейных размеров конструкции ЭТМП при проектировании необходимо учитывать увеличение осевого размера между подшипниками, т.к. неучет может привести к повышенным напряжениям в подшипниках и даже к заклиниванию ротора.

3. Увеличение температуры активных частей ЭТМП при выходе на рабочий режим, сопровождаемое изменением величины воздушного зазора, индуктивных и активных сопротивлений, приводит к деформации механических характеристик, изменению мощностей и токов. Полученные зависимости должны быть учтены при создании расчетных методик.

4. При конструировании ЭТМП необходимо учитывать линейное увеличение наружного диаметра витка ротора и, исходя из этого, выбирать внутренний диаметр желоба, который должен быть больше диаметра витка ротора не более чем на 5-15 мм. Верхний предел объясняется заклиниванием кускового материала и образованием неподвижных слоев пылевидных материалов.

Приведены результаты теоретических исследований, получена зависимость относительно влияния термомеханических изменений в конструкции на параметры и характеристики электротепломеханических преобразователей энергии.

The results of theoretical researches are resulted, dependence is got in relation to influencing of temperature mechanical changes in a construction on parameters and descriptions of the electric thermal mechanical transformer of energy.

Библиографический список

1. Патент України: 39226, 7H05B6/10. Заглибний електронагрівач/ Заблодський М.М., Шинкаренко В.Ф. та інші. –Бюл.№5, част.1-2001.

2. Патент України: 50242, 7F26B17/18. Шнековий сушильний апарат/ Заблодський М.М., Шинкаренко В.Ф. та інші. –Бюл.№1- 2005.

3. 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.-496 с.

4. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. Под редакцией И.М. Постникова. - К.: Наукова думка, 1977. – 176 с.

5. Сопротивление материалов/ Н.М. Беляев.- М.: Наука, 1976.- 608 с.

6. Заблудский Н.Н. Модель электротепломеханического преобразователя как системы с неравновесными термодинамическими процессами преобразования энергии// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Наукові праці КДПУ – Кременчук: КДПУ, 2006 – Вип. 3/2006 (38). Частина 2. – С.117-121.