

## ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОМОДУЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Заблудский Н.Н., к.т.н., доц.

Донбасский горно-металлургический институт

Украина, 94204, Луганской обл., Алчевск, пр. Ленина, 16, ДГМИ, каф. “Электрические машины и аппараты”  
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-05-64, E-mail: info@dgmi.edu.ua, rector@dgmi.edu.ua.

*Запропонована методологія формування вихідних механічних та теплових характеристик багатомодульної електротепломеханічної системи, яка ґрунтується на уявленні про багато масовість кінематичної підсистеми і використанні пінч-аналіза теплообмінної підсистеми.*

*Предложена методология формирования выходных механических и тепловых характеристик многомодульной электротепломеханической системы, основанная на представлении о многомасовости кинематической подсистемы и использовании пинч-анализа для теплообменной подсистемы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка многофункциональных устройств, предполагающих не только функциональное совмещение, но и интеграцию электрических и тепловых процессов – одно из основных направлений по созданию энергосберегающих технологий. Известны методы формирования механических характеристик электромашинных агрегатов с жесткой механической связью между валами, электрических валов, т.е. взаимосвязанного электропривода [1]. Однако известные методы не охватывают класс электротепломеханических систем (ЭТМС), имеющих многомодульную структуру, объединенную одним внешним массивным ротором, выполняющим функции механического и электрического валов [2, 3, 4]. ЭТМС наделены технологическими функциями (транспортировка, сушка, нагрев, перемешивание), причем перерабатываемый материал является одновременно рабочим телом и охлаждающей средой для ЭТМС.

Целью статьи является изложение методологии формирования выходных механических и тепловых характеристик ЭТМС.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТМС

Наибольший интерес представляет шнековая ЭТМС для транспортировки, нагрева (сушки) и перемешивания сыпучих веществ (рис. 1). В этих устройствах использован режим торможения противоключением отдельных модулей (статоров) с целью получения пониженной частоты вращения шнека (60 – 80 об/мин) без применения механического редуктора. Тепловая энергия от потерь в роторе полностью используется для нагрева перерабатываемых сыпучих ингредиентов.

Уравнение движения для ЭТМС имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{ci} = J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{d\omega_i}{dt}, \quad (1)$$

где  $M_i$ ,  $M_{ci}$ ,  $J_i$ ,  $\omega_i$  – соответственно момент электромагнитный, момент нагрузки, момент инерции массы и угловая скорость абсолютного вращательного движения транспортируемого материала на  $i$ -м участке

шнека;  $J_p$ ,  $\omega_p$  – момент инерции и угловая скорость массивного ротора.

Таким образом, ЭТМС представляет собой многополюсную систему, причем при строгом рассмотрении моменты инерции  $J_i$  масс материала и жесткость кинематических звеньев на  $i$ -х участках являются переменными величинами. Количество выгрузочных патрубков шнека для реальных установок может достигать шести, т.е. необходимо вести оценку механических параметров на шести участках шнека. Поскольку наполняемость желоба шнека по мере удаления от выгрузочного патрубка убывает, то угловые скорости абсолютного вращательного движения материала будут различны:

$$\omega_i = \frac{v_{2i}}{r}, \quad (2)$$

где  $r$  – наружный радиус винта шнека;  $v_{2i}$  – касательная составляющая скорости, характеризующая окружную скорость точки в абсолютном вращательном движении.

Далее для каждого из участков ведется оценка суммарной удельной механической мощности:

$$N_{уд,i} = N_{1уд,i} + N_{2уд,i} + N_{3уд,i} + N_{4уд,i} + N_{к.э.уд,i}, \quad (3)$$

где  $N_{1уд,i}, \dots, N_{4уд,i}$  – соответственно удельные мощности, затрачиваемые на подъем материала, преодоление трения материала о лопасть, преодоление сопротивления трения материала о желоб, перемешивания и перемальвания материала;  $N_{к.э.уд,i}$  – удельная мощность, затрачиваемая на сообщение материалу кинетической энергии.

При известной угловой скорости шнековой ЭТМС определяются соответствующие моменты нагрузки  $M_{ci}$  на отдельных участках.

Решая известными аналитическими методами [5] в декартовой системе координат краевую задачу при постоянной величине магнитной проницаемости ферромагнитного сплошного ротора, получим выражение для электромагнитного момента  $M_i$ , приложенного к соответствующим участкам ротора ЭТМС.

Установившейся режим ЭТМС наступает при

$$\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{ci} = 0.$$

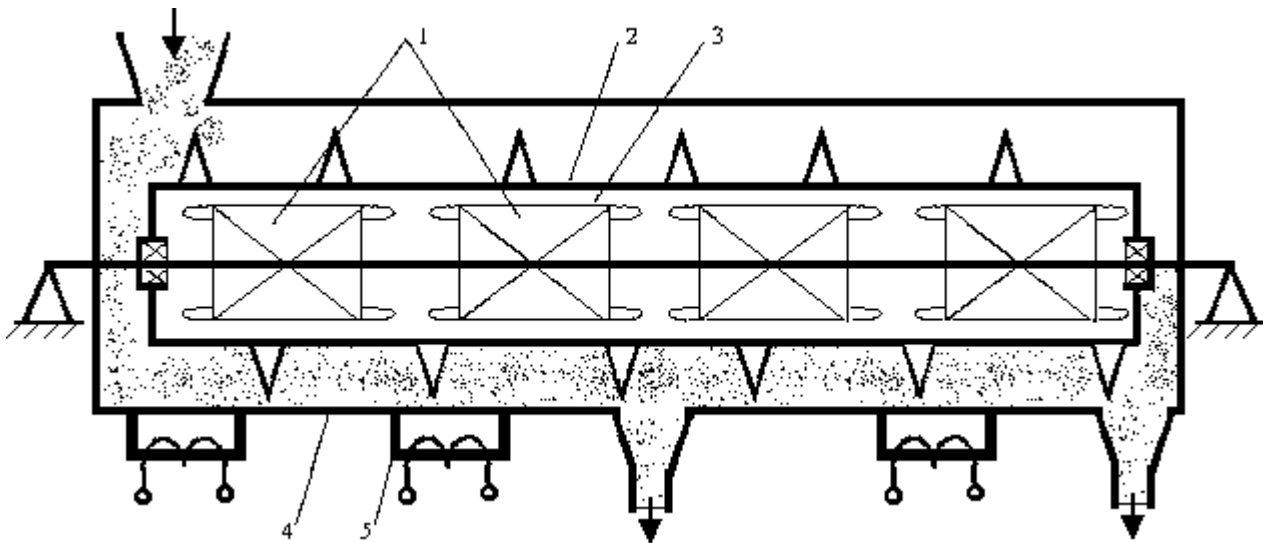


Рис. 1. Шнековая ЭТМС:

1 – статоры; 2 – массивный ротор шнека; 3 – воздушный зазор; 4 – днище шнека; 5 – индукторы для дополнительного подогрева днища

На рис. 2 представлена механическая характеристика для одной пары модулей ЭТМС, расположенных на одном из участков шнека.

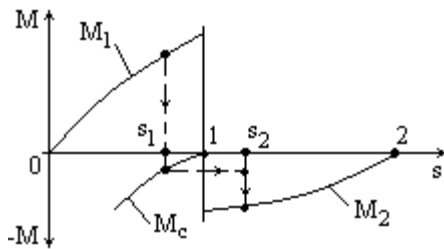


Рис. 2. Механические характеристики противобойствующих модулей

Рабочие скольжения находятся в зоне значений, близких к  $s = 1$ . Условия постоянной скорости и устойчивости частоты вращения шнека в данном случае следующие

$$M_1 - M_2 - M_c = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dM_1}{d\omega} - \frac{dM_2}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} < 0, \quad (5)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – моменты противобойствующих модулей;  $M_c$  – момент сопротивления транспортируемого материала на данном участке шнека.

Более сложная картина взаимодействия электромагнитных и нагрузочных моментов возникает в случае, когда отдельные модули, работающие в режиме противовключения, находятся на различных участках шнека. В этом случае для любого из режимов работы шнековой ЭТМС находят эквивалентный момент нагрузки для различных угловых скоростей абсолютно вращательного движения и моментов инерции масс материала на смежных участках шнека.

#### ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТМС

Изначально задаются такие величины как выход конечной продукции (производительность шнека), его начальная и конечная температура и влажность. Далее ведутся расчеты материальных и энергетических ба-

лансов отдельных ветвей технологического потока. Расчет соответствующих механических мощностей рассмотрен нами ранее. По известным методикам ведутся тепловые расчеты внутримодульной структуры [6], а также необходимой тепловой энергии для нагрева (сушки) материала до заданной температуры (влажности). Часть требуемой тепловой нагрузки может обеспечиваться за счет рекуперации теплоты технологического потока, но основная часть тепловой нагрузки требует подвода внешних источников энергии (внешних горячих утилит). Затем приступаем к проекту теплообменной системы. В результате уточняются значения внешних утилит.

Необходимо отметить, что все этапы и процедуры проектирования взаимосвязаны и взаимообусловлены.

Технологические потоки при сушке сыпучего материала можно разделить на две группы. В одну из них войдут те потоки, которые необходимо нагреть – холодные потоки, в другую – потки, требующие охлаждения перед дальнейшей их обработкой (например, сепарацией) – горячие потоки. Изменение теплосодержания указанных потоков анализируют на температурно-энтальпийной плоскости. Связь между изменением температуры потока и уменьшением (увеличением) его теплосодержания – энтальпии в общем случае будет выражаться нелинейной функцией:

$$dH = c_p M dT, \quad (6)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость вещества в технологическом потоке при постоянном давлении, Дж.кг·К;  $M$  – массовый расход вещества потока, кгс/с;  $T$  – температура, К;  $H$  – теплосодержание потока, Вт.

Общее изменение теплосодержания технологического потока в пределах изменения его температуры:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p M dT, \quad (7)$$

Дополнительно введем понятие потоковой теплоемкости  $CP(T)$ , которая равна произведению удельной теплоемкости  $c_p$  и расхода  $M$ :

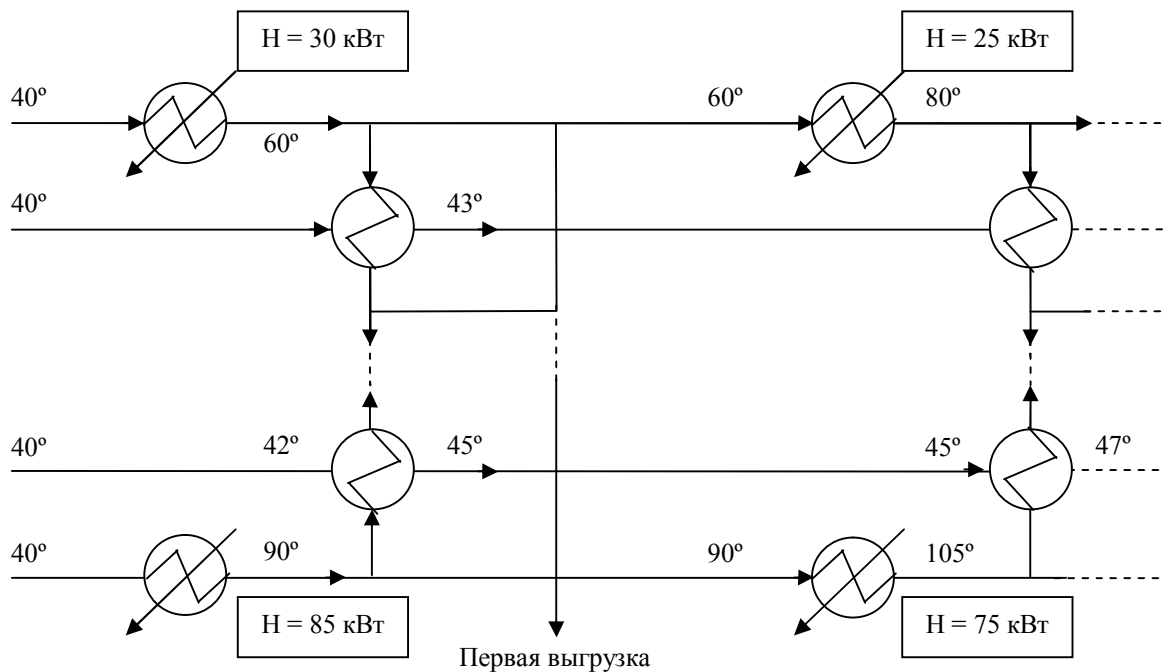


Рис. 3. Технологическая схема шнековой ЭТМС

$$CP(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta T}. \quad (8)$$

Движущей силой в процессе теплопередачи является температурный напор  $\Delta T$  или разность температур теплоносителей, участвующих в теплообмене. На рис. 3 представлена технологическая схема шнековой ЭТМС для переработки рутилового продукта.

Технологический поток условно разделен на несколько (в зависимости от точности расчета) цилиндрических слоев сыпучего материала,двигающегося параллельно оси шнека в одном направлении и имеющих средние значения температур  $T_{ср1}, \dots, T_{срn}$ . Первый и  $n$ -й слои находятся в контакте с цилиндрическими стенками массивного ротора и желоба шнека. Указанные слои снабжаются горячими утилитами путем возбуждения в стенках вихревых токов и передачи тепла от джоулевых потерь в других активных частях модулей шнека. Промежуточные слои получают тепло за счет теплопередачи при теплообмене с первым и  $k$ -м слоями. Кроме того, учитываются диффузионный поток или поток принудительного перемешивания.

На температурно-энтальпийной плоскости строим кривые холодных и горячих потоков для каждого из участков шнековой ЭТМС (рис. 4).

На первом участке увеличение теплосодержания всех слоев происходит за счет внешних утилит. На последнем участке шнека первый и  $k$ -й потоки уже не получают горячих утилит и становятся горячими. В этом случае показаны составные кривые холодных и горячих потоков. При формировании тепловых характеристик необходимо выполнить следующие условия:

- 1) потоки первого и  $k$ -го слоев нельзя перегреть выше допустимых температур, которые определяются условиями сепарации сыпучих материалов;
- 2) внутренние потоки необходимо довести до минимально допустимой температуры (например, 100 °C).

Поэтому необходимо организовать либо интенсивное перемешивание потоков (дополнительная механическая энергия), либо вдувание во внутренние слои дополнительно нагретого за счет внешних утилит воздуха. На рис. 4 указанная тепловая мощность равна  $Q_{\min}$ . Зона, где составные кривые горячих и холодных потоков располагаются одна за другой, соответствуют теплообмену этих потоков. Величина  $\Delta T_{\min}$  – пинч и соответствует наименьшему расстоянию между составными кривыми потоков [6]. Чем меньшее значение  $\Delta T_{\min}$  мы можем получить в тепловой структуре ЭТМС, тем меньшее значение внешних горячих утилит потребуется.

Как уже отмечалось, методология создания ЭТМС базируется на интеграции в одном устройстве свойств и структур таких устройств, как нагреватель, электропривод и исполнительный механизм, с сохранением целевой функции той технологической цепи, которые данные устройства обеспечивали. При этом все виды диссипативной энергии, которые ранее относились к потерям, используются в технологическом процессе переработки сыпучих и легкоплавких материалов.

Существенной разницей в подходах по созданию ЭТМС и созданию электроприводов, в том числе в методах инженерных расчетов, является то, что в ЭТМС тепловой расчет выполняется не только с целью оценки допустимых нагревов изоляционных структур, а прежде всего с целью максимального использования диссипативной энергии.

Сформулируем основные принципы интеграции тепловых процессов в ЭТМС:

1. Принцип координации термоградиента. Эффективное использование диссипативной энергии возможно при условии, когда термоградиенты  $d\theta/dn = \text{grad}\theta$  по линии связи активных частей с перерабатываемым материалом имеют направления в сторону активных

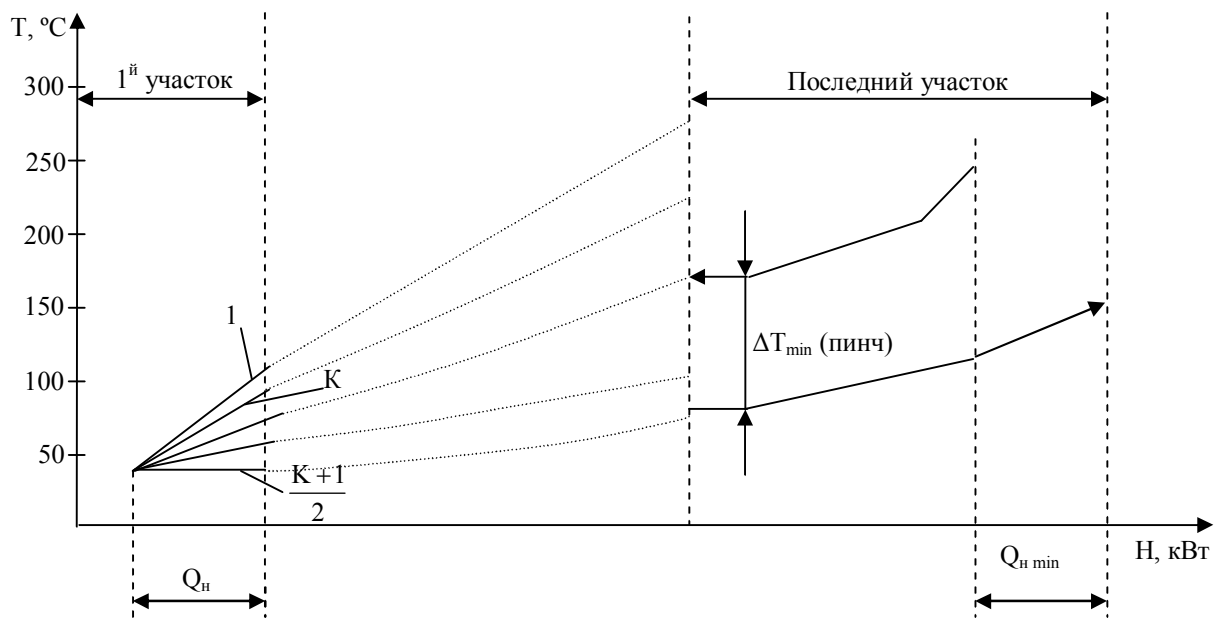


Рис. 4. Кривые холодных и горячих потоков шнековой ЭТМС

частей. В процессах сушки сыпучих веществ градиенты температуры и влажности в системе ЭТМС-материал не должны иметь противоположное направление.

2. Принцип долевого распределения механической и тепловой энергии, который воспроизводится автоматически (даже без дополнительных управляющих устройств) в конструкции ЭТМС и проявляется в регулировании интенсивности теплоотдачи и доли тепловой энергии ротора с обеспечением примерно одинаковой скорости передачи тепла к перерабатываемому материалу.

3. Принцип обеспечения замкнутости тепловых цепей в системе ЭТМС-перерабатываемый материал. Степень замкнутости может быть оценена тепловым КПД ЭТМС.

Изложенная в статье методология формирования выходных характеристик использована при создании шнека длиной 10 м для транспортировки и нагрева рутилового продукта на Вольногорском государственном горно-металлургическом комбинате.

#### ВЫВОДЫ

1. При формировании механических и тепловых характеристик ЭТМС рабочая среда (сыпучий материал) рассматривается как элемент этой системы.

2. Механическая система ЭТМС представляется как многомассовая система с элементами, имеющими, в общем случае, различные значения моментов инерции и кинематической жидкости.

3. Результирующие механические характеристики ЭТМС определяются взаимодействием электромагнитных моментов противодействующих модулей и нагрузочными моментами каждого из участков шнековой ЭТМС.

4. Для анализа сложных тепловых процессов ЭТМС на стадии проектирования целесообразно применять элементы пинч-анализа тепловой системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
- [2] Патент України № 39226, 7Н05В 6/10. Заглибний електронагрівач //Заблодський М.М., Верімієнко В.І.-Бюл. № 5, част. 1.-2001.
- [3] Декларацийний патент № 50242А. 7F26В17/18. Шнековий сушильний апарат // Заблодський М.М. та інш.-Бюл. № 10.-2002.
- [4] Заблодський Н.Н., Захарченко П.И., Плюгин В.Е. Математическое моделирование процессов тепло- массообмена и гидродинамики вращающегося электромеханического нагревателя // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика.- Харьков: НТУ «ХПИ».- 2001. - № 16.-С. 77 – 80.
- [5] Дегтярева Е.Л., Потапов Л.А. исследование механических характеристик электрической машины с массивным ферромагнитным ротором // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. - № 2.-С.23 – 27.
- [6] Заблодський М.М. Теплові розрахунки електротехнічних устаткувань: Навч. посібн. – Алчевськ: ДГМІ, 2003. – 289 с.
- [7] Linnhoff B. Pinch Analysis—a State-of-the-art Overview // Trans IChemE. 1993. Vol 71. Part A, No. 9. P. 503 – 522.

Поступила 1.09.2003