

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Ключевые слова: электродный нагреватель воды, передаточная функция.

Введение

В сельском хозяйстве горячую воду широко используют в системах отопления, процессах кормоприготовления, мастерских, для удовлетворения санитарно-гигиенических нужд, мытья посуды на животноводческих фермах, сепараторов, пастеризаторов, молокопроводов, автоцистерн, молочных танков и других технологических процессах.

Для нагрева воды в большинстве случаев используют электродные установки непрерывного действия [1]. Электродные водонагреватели по сравнению с элементными проще по конструкции, дешевле, надежнее, обладают более высоким КПД, могут быть выполнены на значительно большие мощности.

Особенностью установок непрерывного действия являются небольшие габариты корпуса, поскольку он служит лишь для размещения электродной группы. Вся нагреваемая вода в таких устройствах заключена между электродами.

Вместе с тем серьезные недостатки используемой в настоящее время на практике теории электродного нагрева [1-3], не обеспечивают максимальной теплопроизводительности и минимальных затрат электроэнергии, т.е. не обеспечивают оптимального протекания электротермического процесса. Причиной этого является то, что эмпирические формулы, рекомендуемые в учебной литературе, справедливы только для определенных условий проведения процесса и дают недопустимые погрешности в других условиях. Этому же способствует и целый ряд принимаемых при математическом моделировании упрощающих допущений. В частности, принимаются постоянными во времени нагрева мощность, напряжение, ток и температура. Это допущение соответствует установившемуся режиму работы установки. Однако если изменяется хотя бы одна из перечисленных величин, что имеет место в действительности, то процесс следует считать переходным, т.е. динамическим.

Оптимизация режимов работы электродной установки в значительном диапазоне

расхода нагреваемой воды и определение законов регулирования невозможны без исследования динамических характеристик нагревателя, описываемых передаточными функциями.

Целью работы является получение передаточной функции электродного водонагревателя по возмущающему воздействию.

Объектом исследования является электродный проточный нагреватель жидких сред. Получение передаточной функции нагревателя основано на использовании аналитического метода решения систем линейаризованных дифференциальных уравнений, составленных на основе баланса тепловой энергии.

Результаты и их обсуждение

Представим исследуемую электротермическую систему в виде двух физических тел: нагреваемой воды и корпуса нагревателя. В этом случае теплообмен между водой, находящейся в межэлектродном пространстве, и окружающей средой запишется следующей системой уравнений в отклонениях:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= c_w m_w \frac{d\Delta T_w}{dt} + \Delta Q_1 \\ \Delta Q_1 &= c_{or} m_{or} \frac{d\Delta T_{or}}{dt} + \Delta Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где c_w , c_{or} – удельные теплоемкости воды и корпуса;

m_w , m_{or} – масса воды в межэлектродном пространстве и корпусе;

ΔT_w , ΔT_{or} – отклонения температур воды и корпуса от расчетных;

ΔP , ΔQ_1 , ΔQ_2 – отклонения от расчетных значений мощности и тепловых потоков, соответственно, от воды к корпусу и от корпуса к наружному воздуху.

Введем следующие допущения:

нагреватель рассматривается как линейный объект с сосредоточенными параметрами;

жидкость считается однородным изотропным телом, обладающим бесконечной теплопроводностью;

теплоотдача в окружающую среду происходит мгновенно;

парообразование исключено;

тепловой поток в окружающую среду пропорционален разности температур установки и окружающей среды;

теплоемкость воды, теплоотдача от температуры не зависят;

температура окружающей среды в процессе нагрева не изменяется.

Вместо тепловых потоков в систему уравнений (1) подставим их значения, выраженные через удельные теплоемкости, массы, перепад температур, площади поверхностей теплопередачи и коэффициенты теплообмена:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= c_6 m_6 \frac{d\Delta T_6}{dt} + F_{oz} \alpha_{вн} (\Delta T_6 - \Delta T_{oz}) \\ F_{oz} \alpha_{вн} (\Delta T_6 - \Delta T_{oz}) &= c_{oz} m_{oz} \frac{d\Delta T_{oz}}{dt} - F_{oz} \alpha_{нар} (\Delta T_6 - \Delta T_{oz}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $F_{ог}$ – площадь ограждения;

$T_в, T_{ог}$ – температура, соответственно, воды и ограждения;

$\alpha_{вн}, \alpha_{нар}$ – коэффициенты теплообмена на внутренней и внешней поверхностях корпуса;

$T_{нар}$ – температура окружающей среды.

Известно, что мощность электродного водонагревателя зависит от времени τ_n , за которое жидкость проходит всю электродную систему длиной h со скоростью $v = m/jF_{ж}$ и расхода $\tau_n = \Delta m_в/m$, где j – плотность воды, $кг/м^3$, $F_{ж}$ – площадь сечения межэлектродного пространства, $м^2$, m – общая масса нагреваемой воды, $кг$, $\Delta m_в$ – приращение массы воды в межэлектродном пространстве или расход воды, $кг/с$ [4].

$$\Delta P = P_1 \left(\frac{1}{1-K} - 0,5 \right) + T_n \frac{m}{\Delta m_в} \left(1,5 - \frac{1}{K} \right) \left[\frac{1 - e^{-\frac{\Delta m_в (1-K)}{m T_n}}}{1-K} \right], \quad (3)$$

где $P_1 = P_{20,v} [1 + \alpha_t (t - 20)] = \frac{E^2}{\rho_{20}} [1 + \alpha_t (t - 20)]$ – мощность включения, Вт;

$P_{20,v}$ – удельная объемная мощность при температуре воды $20^\circ C$, Вт;

α_t – температурный коэффициент электролита;

E – напряженность электрического поля, Вт/м;

ρ_{20} – удельное сопротивление воды при $20^\circ C$, Ом·м;

$K = \frac{P_{20,v} \cdot \alpha_t}{A_v}$ – кратность эталонной мощности;

где A_v – удельная объемная теплоотдача с поверхности нагревателя, $\frac{Вт}{м^3 \cdot град}$;

$$A_v = \frac{\alpha_t F}{V},$$

где α – удельная теплоотдача с поверхности нагревателя при данной температуре воды, $\frac{Вт}{м^2 \cdot град}$;

F – площадь теплоотдачи, $м^2$;

V – объем жидкости в нагревателе, $м^3$;

$T_n = \frac{j c}{A_v}$ – естественная постоянная времени нагрева, с.

При $K \rightarrow 1$:

$$\Delta P = P_1 + 0,5 P_1 \frac{\Delta m_в}{m T_n}. \quad (4)$$

Выражение (3) в результате разложения экспоненты в ряд и с учетом первых трех членов разложения после соответствующих преобразований принимает вид:

$$\Delta P = P_1 \left(\frac{1}{1-K} - 0,5 \right) + \left(1,5P_1 - \frac{P_1}{1-K} \right) \left(1 + \frac{\Delta m_{\epsilon}}{mT_n} (1-K) \right). \quad (5)$$

После подставления выражения (5) в систему уравнений (2) и разделения переменных получим:

$$T_1^2 \frac{d^2 \Delta T_{\epsilon}}{dt^2} + T_2 \frac{d \Delta T_{\epsilon}}{dt} + \Delta T_{\epsilon} = k \left(T \frac{d \Delta m_{\epsilon}}{dt} + m_{\epsilon} \right) + C, \quad (6)$$

или

$$\Delta T_{\epsilon} (T_1 p^2 + T_2 p + 1) = k(Tp + 1) \Delta m_{\epsilon} + C, \quad (7)$$

где $T_1^2 = \frac{C_{oz} \cdot m_{oz} \cdot C_{\epsilon} \cdot m_{\epsilon}}{F_{oz}^2 \cdot \alpha_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{нар}}}$;

$$T_2 = \left(C_{oz} \cdot m_{oz} + C_{\epsilon} \cdot m_{\epsilon} \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right) \right) \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_{oz}};$$

$$k = \frac{P_1}{mT_n} \left(1,5 - \frac{1}{1-K} \right) (1-K) \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_{oz}} \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right);$$

$$T = \frac{C_{oz} \cdot m_{oz}}{F_{oz} \cdot \alpha_{\text{вн}}} \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right);$$

$$C = \frac{P_1}{F_{oz} \cdot \alpha_{\text{нар}}} \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right) + T_{\text{нар}}.$$

В уравнении (6) результируемой величиной является ΔT_{ϵ} , возмущением – Δm_{ϵ} .

Тогда, в соответствии с определенным, передаточная функция проточного электродного водонагревателя имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{\Delta T_{\epsilon}(p)}{\Delta m_{\epsilon}(p)} = \frac{k(Tp + 1)}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (8)$$

Передаточную функцию при $K \rightarrow 1$ получим по аналогии, подставив (4) в систему (2):

$$T_1' \frac{d^2 \Delta T_{\epsilon}}{dt^2} + T_2' \frac{d \Delta T_{\epsilon}}{dt} + \Delta T_{\epsilon} = k' \left(T' \frac{d \Delta m_{\epsilon}}{dt} + \Delta m_{\epsilon} \right) + C', \quad (9)$$

или

$$\Delta T_{\epsilon} (T_1' p^2 + T_2' p + 1) = k'(Tp + 1) \Delta m_{\epsilon} + C', \quad (10)$$

где $T_1' = \frac{C_{oz} \cdot m_{oz} \cdot C_{\epsilon} \cdot m_{\epsilon}}{F_{oz}^2 \cdot \alpha_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{нар}}}$;

$$T_2' = \frac{1}{F_{oz} \cdot \alpha_{\text{нар}}} \left(C_{oz} \cdot m_{oz} + \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right) \right);$$

$$k' = \frac{0,5P_1}{mT_n F_{oz} \alpha_{\text{нар}}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} \right);$$

$$T' = \frac{C_{oz} \cdot m_{oz}}{F_{oz} \cdot \alpha_{\text{вн}}} \left(\frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} + 1 \right);$$

$$C' = \frac{P_1}{F_{oz} \cdot \alpha_{\text{нар}}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{нар}}}{\alpha_{\text{вн}}} \right) + T_{\text{нар}}.$$

Тогда

$$W(p) = \frac{\Delta T_{\epsilon}(p)}{\Delta m_{\epsilon}(p)} = \frac{k'(Tp + 1)}{T_1'^2 p^2 + T_2' p + 1}. \quad (11)$$

Важной особенностью полученных передаточных функций (8), (11) является учет зависимости мощности нагревателя от расхода воды (массы воды в межэлектродном пространстве) и опосредованно от длины электродов и скорости перемещения воды.

Передаточная функция представляет собой произведение дифференцирующего звена первого порядка и колебательного звена второго порядка, что соответствует их последовательному включению.

Заключение

Достоинством аналитического метода является возможность получения динамических характеристик (в том числе частотных) объекта управления на стадии проектирования. Однако при этом возмущающее воздействие представлено скачкообразным импульсом и не учитывается инерционность

процесса. Коэффициенты передаточной функции с учетом конкретных особенностей процесса нагрева можно получить только экспериментальным путем.

Библиографический список

1. Электротермическое оборудование для сельскохозяйственного производства / Н.Б. Каган, В.Г. Кауфман, М.Г. Пронько, Г.Д. Яневский. – М.: Энергия, 1980. – с. 192.
2. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А. Электрический нагрев и электроотехнология. – М.: Колос, 1975. – 384 с.
3. Электротехнология / А.М. Басов, В.Г. Быков, А.В. Лаптев, В.Б. Файн. – М.: Агропромиздат, 1985. – 256 с.
4. Королев В.А. Динамика процессов электродного нагрева жидкостей: учебное пособие. – Б.м., 1988. – 38 с.

