

УДК 621.365.683.9

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ НЕПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ-ДАТЧИКОВ С ЗОНИРОВАННОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ

М.А. ПРИЩЕПОВ, к.т.н.; И.Г. РУТКОВСКИЙ (БГАТУ)

В современном сельскохозяйственном производстве до 30% потребления электроэнергии приходится на нагрев. Автоматизация электронагревательных установок (ЭНУ) позволяет снизить расход электроэнергии, но приводит к значительному увеличению стоимости нагревательных установок. Разработка недорогого электродного электронагревателя-датчика (ЭЭН-Д) с простой системой регулирования является актуальной задачей. Анализ возможных вариантов электротепловых схем ЭЭН-Д показывает, что для практического применения наиболее приемлемы емкостные ЭЭН-Д с зонированной системой электродов. Такая электродная система на практике реализуется наиболее просто и требует минимальных затрат, кроме того ЭНУ на базе емкостных ЭЭН-Д могут аккумулировать тепловую энергию в ночное время.

Электротепловая схема ЭЭН-Д с зонированной системой электродов, погруженных в емкость с обрабатываемой средой, изображена на рис. 1. Применение этой конструкции возможно в устройствах периодического действия при подогреве воды, обраты, молока и производстве пара.

На электротепловые характеристики емкостных электродных электронагревателей с зонированной системой электродов значительное влияние оказывает выраженная температурная зависимость удельного сопротивления обрабатываемой среды. Эта зависимость влияет на распределение удельной мощности нагрева, на скорость перемещения обрабатываемой среды между электродами (за счет тепломассопереноса при естественной конвекции) и соответственно на величину информационного сигнала.

При нагреве температура среды изменяется во времени и по высоте электродов ЭЭН-Д за счет тепломассопереноса. Тогда происходящие электротепловые процессы будут описываться следующей сис-

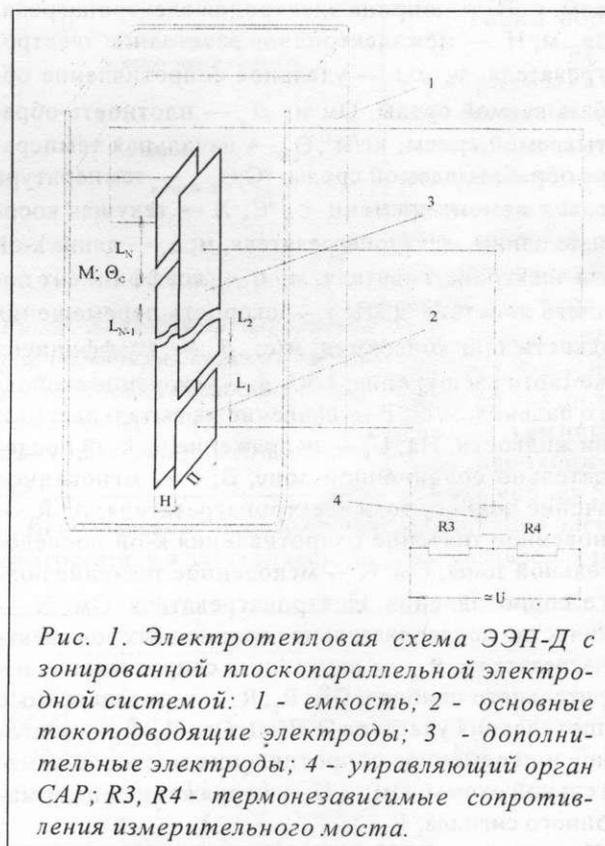


Рис. 1. Электротепловая схема ЭЭН-Д с зонированной плоскопараллельной электродной системой: 1 - емкость; 2 - основные токоподводящие электроды; 3 - дополнительные электроды; 4 - управляющий орган САР; R3, R4 - термозависимые сопротивления измерительного моста.

темой дифференциально-интегральных уравнений:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \beta \cdot g \cdot (\theta_c - \theta_{с.н}); \quad (1)$$

$$C_p \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = \beta \cdot \theta_c \cdot v \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho l(\theta_c) \cdot H^2}; \quad (2)$$

$$U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \quad (3)$$

$$I = U / R; \quad (4)$$

$$R_k = \sum_{k=1}^N R_k; \quad (5)$$

$$R_k = \int_0^{L_k} \rho t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H dx / \left(\int_0^{L_k} \Pi dx \cdot L_k^2 \right); \quad (6)$$

$$C_p \cdot M \cdot (\theta_{c\tau} - \theta_{cH}) = \eta \cdot \int_0^{\tau_H} I^2 \cdot R d\tau; \quad (7)$$

$$\Delta U = U \cdot R_{np} \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4) \cdot R_{np} + R_1 \cdot R_2 \cdot (R_3 + R_4) + R_3 \cdot R_4 \cdot (R_1 + R_2)}; \quad (8)$$

где C_p — удельная теплоемкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·°C); U — напряжение питания, В; M — масса обрабатываемой среды, кг; θ_c — температура обрабатываемой среды, °C; τ_H — время нагрева среды, с; Π — ширина электродов электронагревателя, м; H — межэлектродное расстояние электронагревателя, м; ρt — удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м; ρ_c — плотность обрабатываемой среды, кг/м³; θ_{cH} — начальная температура обрабатываемой среды, °C; $\theta_{c\tau}$ — температура среды в момент времени τ , °C; X — текущая координата длины электронагревателя, м; L_k — длина k -ой зоны электронагревателя, м; η — коэффициент полезного действия ЭЭН; v — скорость перемещения жидкости при конвекции, м/с; β — коэффициент объемного расширения, 1/°C; g — ускорение свободного падения, м/с²; P — давление на выталкиваемые слои жидкости, Па; U_k — напряжение на k -ой последовательно соединенной зоне, В; I — мгновенное значение полного тока электронагревателя, А; R_k — мгновенное значение сопротивления k -ой последовательной зоны, Ом; R — мгновенное значение полного сопротивления электронагревателя, Ом; N — количество последовательно соединенных зон электронагревателя; R_{np} — внутреннее сопротивление измерительного прибора, Ом; R_1, R_2 — термозависимые сопротивления участков ЭЭН-Д, Ом; R_3, R_4 — постоянное и переменное сопротивления мостовой измерительной схемы, Ом; ΔU — напряжение информационного сигнала, В.

При расчете ЭЭН-Д используемых для нагрева токопроводящих сред в диапазоне рабочих температур и давлений можно сделать некоторые допущения:

— физические свойства жидкости не зависят от температуры;

— в уравнении энергии градиент давления незначительный по сравнению с тепловой конвекцией и выделяемой энергией.

Приведенные выше допущения позволяют рассматривать процесс в одномерном пространстве и

во времени и записать уравнение (2) в виде:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot \left(\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right) = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{\rho t(\theta_c) \cdot H^2}. \quad (9)$$

Решение дифференциальных уравнений движения и энергии для емкостного зонированного ЭЭН-Д находим в виде $v(x, \tau)$ и $\theta(x, \tau)$ при заданных исходных данных и начальных условиях. При определении начальных условий при $x=0$ и $\tau=0$ исходят из реальных значений температуры и скорости в начале нагревателя в любой момент времени нагрева и начальной температуры и скорости по всей длине L в начале нагрева:

$$\theta_c = \theta_{c\tau} \quad \text{и} \quad dv/dx = 0 \quad \text{при} \quad x=0; \quad (10)$$

$$\theta_c = \theta_{cH} \quad \text{и} \quad v=0 \quad \text{при} \quad \tau=0. \quad (11)$$

Приведенная математическая модель содержит уравнения в частных производных и для ее решения целесообразно использовать численные конечно-разностные методы, с помощью которых можно получить таблицу приближенных значений исходного решения.

Для решения этих уравнений введем разностную сетку с координатами узлов (x_j, τ^n) ,

$$\text{где } x_j = jh; \quad j = 1, 2, 3, \dots, J; \quad \tau^n = \sum_{n=1}^T \tau^n,$$

где J — количество узлов разностной сетки по координате X ;

T — количество узлов разностной сетки по времени;

h — шаг разностной сетки по координате X , м;

τ^n — шаг разностной сетки по времени, с;

j — текущее значение координаты разностной сетки по длине;

n — текущее значение координаты разностной сетки по времени.

Тогда для уравнения (9) на симметричном прямоугольном шаблоне построим следующую разностную схему:

$$\frac{\theta_{c,j-1}^{n+1} - \theta_{c,j-1}^n}{2\tau} + \frac{\theta_{c,j}^{n+1} - \theta_{c,j}^n}{2\tau} + \frac{v \cdot (\theta_{c,j}^n - \theta_{c,j-1}^n)}{2h} + \frac{v \cdot (\theta_{c,j}^{n+1} - \theta_{c,j-1}^{n+1})}{2h} = \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2 \rho t(\theta_{c,j}^n) H^2 C_p \rho_c} + \frac{U_k^2 \cdot \eta}{2 \rho t(\theta_{c,j-1}^{n+1}) H^2 C_p \rho_c}, \quad (12)$$

аналогично, для уравнения (1):

$$\frac{v_{j-1}^{n+1} - v_{j-1}^n}{2\tau} + \frac{v_j^{n+1} - v_j^n}{2\tau} + \frac{v_j^n - v_{j-1}^n}{2h} + \frac{v_{j-1}^{n+1} - v_{j-1}^{n+1}}{2h} = (\beta g (\theta_{c,j}^n - \theta_{c,j-1}^n) + \beta g (\theta_{c,j}^{n+1} - \theta_{c,j-1}^{n+1})) / 2. \quad (13)$$

Производные по времени τ здесь аппроксими-

руются в виде двух полусумм конечных разностей в $j-1$ -м и j -м узлах разностной схемы, а производные по X в виде двух полусумм на n -м и $n+1$ -м временных слоях.

Приведенные двухслойные четырехточечные схемы формально построены как неявные. Однако из них можно выразить неизвестные $\Theta_{c_j}^{n+1}$ и v_j^{n+1} :

$$\Theta_{c_j}^{n+1} = \frac{2\tau F_j^n + (1+v\tau/h)\Theta_{c_{j-1}}^n + (1-v\tau/h)(\Theta_{c_j}^n - \Theta_{c_{j+1}}^n)}{1+v\tau/h} \quad (14)$$

где

$$F_j^n = \frac{U_k^2 \eta}{2\rho t(\Theta_{c_j}^n) H^2 C_p \rho c} + \frac{U_k^2 \eta}{2\rho t(\Theta_{c_{j-1}}^{n+1}) H^2 C_p \rho c}; \quad (15)$$

$$v_j^{n+1} = \frac{2\tau F v_j^n + v_{j-1}^n(1+\tau v_j^n/h) + v_j^n(1-\tau v_j^n/h) - v_{j-1}^{n+1}(1-\tau v_{j-1}^{n+1}/h)}{1+\tau v_{j-1}^{n+1}/h}, \quad (16)$$

где

$$F v_j^n = (\beta g (\Theta_{c_j}^n - \Theta_{c_{j-1}}^n) + \beta g (\Theta_{c_j}^{n+1} - \Theta_{c_{j-1}}^{n+1}))/2. \quad (17)$$

Полученные схемы являются схемами бегущего счета и позволяют последовательно находить значения функции в узлах разностной сетки. На рис. 2 представлен укрупненный алгоритм расчета электротепловых характеристик ЭЭН-Д.

Проведенные расчеты электротепловых характеристик емкостных зонированных ЭЭН-Д свидетельствуют о наличии высокого сигнала в измерительной диагонали его мостовой схемы, что позволяет применять простую схему управления такой ЭНУ (рис. 3).

Работает электронагреватель следующим образом. Обрабатываемая среда заполняет межэлектродное пространство между электродами. Измерительный мост, образованный сопротивлением обрабатываемой среды $R1$ между нижним токоподводящим и дополнительным электродами и сопротивлением обрабатываемой среды $R2$ между верхним токоподводящим и дополнительным электродом, а также сопротивлениями $R3$ и $R4$ сбалансирован при нагретом состоянии обрабатываемой среды. При нажатии кнопки $S1$ подается потенциал с анода семистора $VS1$, через балластное сопротивление $R5$ на управляющий электрод семистора $VS1$, который открывается и подает напряжение на большие электроды. При низкой температуре обрабатываемой среды измерительный мост находится в состоянии разбаланса. Потенциал напряжения разбаланса моста DU с измерительного электрода и точки соединения резисторов $R3$ и $R4$ подается на вход диодного моста $VD1$, переменное напряжение выпрямляется и подается на катушку реле $KV1$, которое срабатывает и замыканием контакта блокирует семистор $VS1$ во включенном состоянии. В процессе нагрева, за счет перераспределения подогретой обрабатываемой среды путем естествен-

ной конвекции по высоте емкости электронагревателя, изменяется напряжение разбаланса моста DU . При достижении требуемой температуры обрабатываемой среды напряжение разбаланса моста DU уменьшится до определенной величины, соответственно уменьшится напряжение на катушке реле $KV1$ до величины напряжения отпущения реле $U_{отп}$. Таким образом реле $KV1$ размыкает контакт и снимает потенциал с управляющего электрода семистора $VS1$, который отключает напряжение с электродов ЭЭН-Д. Для повторения цикла нагрева среды до заданной температуры необходимо нажать кнопку $S1$.

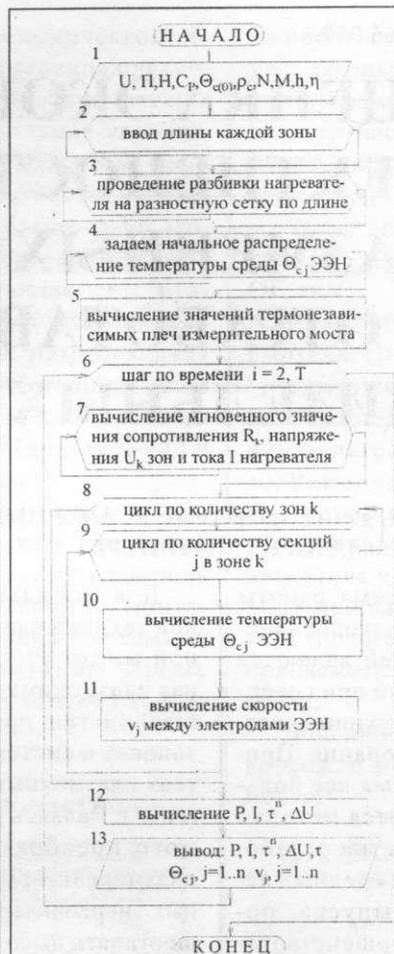


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета динамических электротепловых характеристик емкостного ЭЭН-Д с зонированной электродной системой.

Использование предложенной конструкции электронагревателя и электрической схемы управления по-

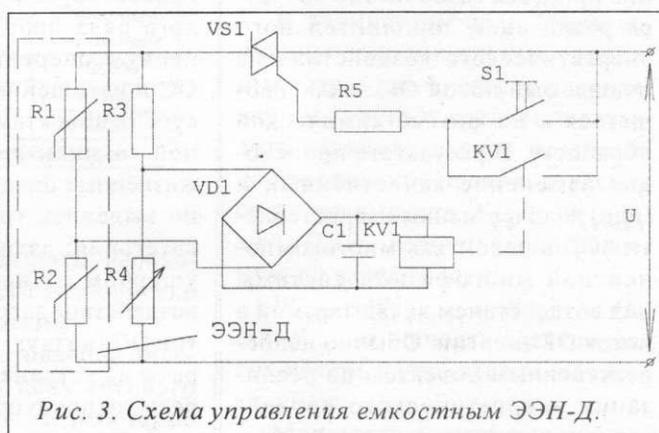


Рис. 3. Схема управления емкостным ЭЭН-Д.

звляет в 1,2..1,25 раза уменьшить затраты электроэнергии на нагрев среды, упростить эксплуатацию, а также повысить надежность работы электронагревателя.