

плуатационные расходы по подъему и распределению воды составляют основную часть всех денежных расходов на водоснабжение.

Одним из новых и наиболее прогрессивных направлений экономии электроэнергии в электроприводах в настоящее время является применение частотного регулирования (ЧР). Однако его практическая реализация связана с затратами значительных денежных средств. Очевидно, что в условиях развития в республике рыночных отношений их оправданность должна быть экономически аргументирована.

Оценка экономической и энергетической эффективности применения ЧР проведена на примере Зилейского водозабора. В соответствии с фактическими замерами среднесуточное потребление электроэнергии приводами водозабора до внедрения ЧР составило 3,76, а после - 1,65 тыс. кВт·ч, т.е. снизилось на 56%. Стоимость сэкономленной электроэнергии при существующих тарифах составляет более 930 млн.руб. Суммарные капиталовложения, необходимые для приобретения, транспортировки, монтажа и отладки оборудования, составляют 510 млн.руб. В качестве критерия эффективности внедрения ЧР принят интегральный эффект за расчетный период, равный 11 годам. Расчеты показывают, что установка ЧР обеспечивает получение годового дохода порядка 900 млн.руб. Экономия топлива составляет 0.68 т.т. в год. Интегральный эффект за расчетный срок превышает 5 млрд.руб., а срок окупаемости дополнительных капиталовложений не превышает полгода. Таким образом, внедрение ЧР является экономически выгодным энергосберегающим мероприятием.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЗОННОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА

УДК 621.365.683.9

Прищепов М.А., к.т.н.,
Рутковский И.Г., инженер
(БАТУ)

При разработке электродного пастеризатора молока существует проблема борьбы с отложениями на его электродах, приводящая к нарушению нормального режима работы электродного электронагревателя (ЭН). По исследованиям Нания Е.П. [1] при электродном нагреве молока

количество отложений на электродах зависит от плотности тока и турбулентности потока молока в ЭЭН пастеризатора, последние в свою очередь зависят от скорости протекания молока в электропастеризаторе и гидравлического радиуса поперечного сечения канала ЭЭН.

Разрабатываемые электродные электропастеризаторы с однозонными электродными электронагревателями молока работают только при производительности 5 т/час и выше. При более низких производительностях электропастеризаторов для того, чтобы обеспечить требуемую скорость протекания молока в канале ЭЭН, необходимо уменьшить межэлектродное расстояние. Однако при низком удельном сопротивлении молока при этом требуется применение понижающих трансформаторов, что значительно увеличивает стоимость установки. Разработанные Наншем Е.П. электродные электропастеризаторы на производительность до 5 т/час с винтом для повышения турбулентности потока молока также не нашли практического применения. При использовании в электропастеризаторах молока многозонных электродных электронагревателей (рис. 1) отпадает необходимость в понижающих трансформаторах. Однако это приводит к некоторому повышению материалоемкости установки. Для предотвращения завышения материалоемкости необходимо провести оптимизацию рассчитанной установки с учетом ее материалоемкости и габаритных размеров, которые определяются из конструктивных и технологических требований и, кроме того, влияют на скорость потока молока и турбулентность его потока.

Под материалоемкостью электродного электронагревателя понимается векторная свертка критериев материалоемкостей электродов и материалоемкости корпуса ЭЭН.

Задача оптимизации ЭЭН в математическом плане сводится к поиску минимального значения принятой целевой функции

$$Z_y \rightarrow \min; \quad (1)$$

при минимальной длине ЭЭН:

$$L \rightarrow \min, \quad (2)$$

при выполнении ограничений

$$J - J_{\text{доп}} \leq \vartheta; \quad (3)$$

$$\text{Re} - 3280 \geq \xi; \quad (4)$$

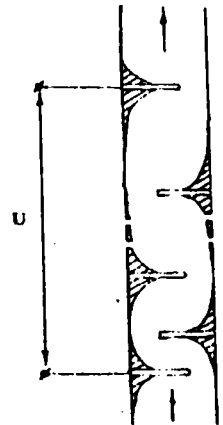


Рис. 1.

$$\Pi - H \geq \varepsilon, \quad (5)$$

где ε , ξ и ϑ - некоторые малые величины, характеризующие точность выполнения ограничений; J - плотность тока в ЭЭН, $J_{\text{доп}}$ - допустимая плотность тока в межэлектродном пространстве ЭЭН, Re - коэффициент Рейнольдса, Π - ширина электродов, H - межэлектродное расстояние.

Поскольку плотность тока, рассчитанная с учетом зависимости допустимых значений плотности тока от скорости молока, значительно ниже плотности тока, которая допускается при данных значениях удельного сопротивления молока $J_{\text{доп}} = f(\rho l(\theta c))$, то при соблюдении ограничений (4) и (5) ограничение (3) будет выполняться автоматически и в дальнейших расчетах последнее можно не учитывать.

Материалоемкость установки складывается из материалоемкости электродов Z_3 и корпуса Z_k :

$$Z_y = \gamma_k Z_k + \gamma_3 Z_3, \quad (6)$$

где γ_k и γ_3 - коэффициент веса критериев материалоемкостей электродов и материалоемкости корпуса, причем $\gamma_k + \gamma_3 = 1$.

Для конкретной типовой конструкции можно принять зависимость материалоемкости корпуса от его габаритных размеров, которые зависят от размеров электродов (Π - ширины, V - длины), межэлектродного расстояния H и количества зон нагрева n , из которых находятся размеры электродных камер для всех зон нагрева и размеры всех переходных камер между соседними зонами нагрева.

$$Z_k = f_1(\Pi, V_L, H, n). \quad (7)$$

Материалоемкость электродов будет определяться количеством электродов и их габаритными размерами. При расчете электродного электронагревателя для конкретной обрабатываемой среды, на определенную мощность и производительность и подключенного к питающему напряжению постоянной величины площадь электродов будет зависеть от межэлектродного расстояния, ширины электродов и коэффициентов запаса по допустимой плотности тока K_3 , закладываемых в расчет конструкции ЭЭН.

$$Z_3 = f_2(\Pi, H, K_3). \quad (8)$$

Таким образом, целевую функцию оптимизации конструктивных параметров ЭЭН можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Z_y &\rightarrow \min; \\ L &\rightarrow \min; \\ Re - 3280 &\geq \xi; \\ \Pi - H &\geq \varepsilon; \\ Z_y &= \gamma_k Z_k + \gamma_3 Z_3 \\ Z_k &= f_1(\Pi, V, H, n) \\ Z &= f_2(\Pi, H, K_2) \\ \gamma_k + \gamma_3 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Приведенная система уравнений так же, как и уравнения, описывающие распределение температуры в ЭЭН по длине и во времени, не имеет точного аналитического решения и решается только численно на ЭВМ на основе использования численных методов оптимизации.

Основная цель применения математических методов оптимизации состоит в том, чтобы осуществить вычислительный процесс наиболее эффективным способом с учетом инженерной специфики поставленной задачи и возможностей используемых ЭНУ.

Выбор метода оптимизации указанной задачи как и в любом другом случае определяется ее классификацией. Данная задача является детерминированной, так как подлежащий оптимизации критерий (минимальная материалоемкость при минимальной длине) - детерминированная (неслучайная) функция оптимизируемых параметров. Поскольку на конструктивные параметры и параметр состояния (турбулентность потока) наложены ограничения, то данная задача является задачей условной оптимизации. Сложность задачи в значительной мере определяется видом критерия эффективности. Так как в нашем случае критерий эффективности определяется в неявной форме нелинейным выражением, описывающим зависимость критерия эффективности от оптимизируемых параметров, то и задача оптимизации относится к области задач нелинейного программирования с несколькими переменными.

Поскольку у многоюгоного ЭЭН электротепловые характеристики и конструктивные параметры взаимозависимы, поэтому при расчете ЭЭН изменение одного из конструктивных параметров ведет к изменению

других конструктивных параметров. А при оптимизации необходимо изменяемые величины разбить на уровни таким образом, чтобы варьирование параметров на нижних уровнях не влияло на параметры верхнего уровня. Таким образом, задача сводится к поэтапной оптимизации, при которой изменение параметра верхнего уровня приводит к необходимости последовательной корректировки всех нижестоящих уровней.

Следует заметить, что наличие ограничений при решении оптимизационных задач существенно уменьшает размеры области, в которой производится поиск оптимума. На первый взгляд может показаться, что уменьшение размеров допустимой области должно ускорить процедуру его поиска. Между тем, напротив, процесс оптимизации становится более сложным и в ряде случаев, когда, например, целевая функция имеет высокую степень овражности, точность расчета при этом уменьшается из-за ошибок округления ЭВМ. Наличие жестких ограничений в виде равенств (что имеет место в нашем случае) ограничивает возможность реализации существующих методов решения оптимизационных задач.

В представленной задаче целевая функция задана не в явном виде, а системой уравнений, аналитическое определение производных целевой функции невозможно. Определение производных с помощью различных численных методов осуществляется с ошибками, которые существенно ограничивают применение методов оптимизации более высокого порядка, несмотря на их высокую скорость сходимости.

Для сведения исходной задачи с ограничениями к задаче без ограничений можно воспользоваться универсальным и простым методом внешних штрафных функций, относящихся к группе непрямых методов. Он позволяет преобразовать задачу условной оптимизации в последовательность задач безусловной оптимизации некоторой вспомогательной функции. Последняя получается путем модернизации целевой функции с помощью функций ограничений таким образом, чтобы ограничения в явном виде в задаче оптимизации не фигурировали.

В общем случае вспомогательная функция имеет вид:

$$F(x, \alpha) = f(x) + \Phi(x, \alpha), \quad (10)$$

где $f(x)$ - целевая функция задачи; $\Phi(x, \alpha)$ - внешняя штрафная функция; α - параметр / $\alpha > 0$ /.

Функцию $\Phi(x, \alpha)$ выбирают такой, что ее значение равно нулю внутри и на границе некоторой допустимой области оптимизируемых параметров, а вне ее - положительно и возрастает тем больше, чем сильнее нарушаются ограничения, "штрафуя" при этом удаление от допустимой области.

В нашем случае внешнюю штрафную функцию можно записать в виде

$$\Phi(x, \alpha) = \alpha[\varphi(x) + \psi(x)], \quad (11)$$

где $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ - функции, определяемые соответственно ограничениями (4) и (5) исходной задачи.

Здесь

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } Re - 3280 - \xi \geq 0 \\ |Re - 3280 - \xi|, & \text{если } Re - 3280 - \xi < 0 \end{cases}; \quad (12)$$

$$\psi(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } \Pi H - \varepsilon \geq 0 \\ |\Pi H - \varepsilon|, & \text{если } \Pi H - \varepsilon < 0 \end{cases}; \quad (13)$$

Вспомогательная функция $F(x, \alpha)$ при этом будет иметь вид

$$F(x, \alpha) = f(x) + \alpha[\varphi(x) + \psi(x)]. \quad (14)$$

Алгоритм представленного метода состоит в следующем,

Расчет ЭЭН проводим, выбирая допустимую плотность тока, исходя из турбулентности потока молока, которая зависит от скорости молока в межэлектродном канале и габаритных размеров ЭЭН:

$$J_d = f(Re); \quad (15)$$

$$Re = 2 \cdot V \cdot (\Pi H / (\Pi + H)) / \nu; \quad (16)$$

$$V = G / (\rho_c \cdot H \cdot \Pi), \quad (17)$$

где V - скорость потока молока;

ν - вязкость молока.

При расчете конструктивных параметров многозонных электродных электронагревателей на последней из рассчитываемых зон наблюдалось несовпадение напряжения U_k , полученного по допустимой плотности тока

из формулы (18) и остаточного U_0 , равного разности между полным напряжением питания U и суммарным напряжением U_s на рассчитанных долях нагрева.

$$U_k = H \cdot J_a \cdot \rho t(\theta c) / Kz, \quad (18)$$

где $\rho t(\theta c)$ - удельное сопротивление обрабатываемой среды.

Полученное несовпадение указанных напряжений приводит к завышению длины последней зоны, которая определяется как и все предыдущие из дифференциального уравнения, описывающего электротепловые процессы, происходящие в нагревателе в одномерном пространстве в статике для любой k -ой зоны:

$$C_p \cdot G \cdot \frac{d\theta c}{dx} = U_k^2 \cdot \Pi \cdot h / (\rho t(q c) \cdot H), \quad (19)$$

где C_p - удельная теплоемкость обрабатываемой среды; G - массовый расход обрабатываемой среды; θc - температура обрабатываемой среды; x - текущая координата длины нагревателя; h - КПД электронагревателя.

При этом из уравнения очевидно, чем выше несовпадение этих напряжений, т.е. чем $U_0 < U_k$, тем значительнее завышение длины последней зоны. Поэтому при оптимизации конструктивных параметров нагревателя независимо от вида целевой функции необходимо в первую очередь на нижнем уровне варьировать межэлектродным расстоянием H .

Затем на следующем уровне оптимизации необходимо определить оптимальные габаритные размеры и материалоемкость для выбранного межэлектродного расстояния (соответственно для выбранного количества зон нагрева). Для этого изменяем ширину электродов, при изменении которой изменяется как длина электродов и их площадь, так и критерий Re . Причем, повышение ширины электродов приводит к уменьшению длины ЭЭН и понижению критерия Re . Изменение критерия Re приводит к изменению допустимой плотности тока, что приводит к некоторому изменению площади электродов ЭЭН. Чтобы выбрать оптимальную ширину электродов, необходимо варьировать ее значением и контролировать изменение длины ЭЭН, при этом необходимо также учитывать ограничения по критерию Re и соотношению межэлектродного расстояния и ширины электродов.

Оптимизация ЭЭН на верхнем уровне сводится к изменению количества зон нагрева, которое зависит от межэлектродного расстояния и коэффициента запаса по допустимой плотности тока. Изменяя межэлектродное расстояние, выбираем оптимальным количество зон нагрева ЭЭН. На верхнем уровне оптимизации также учитываются вышеприведенные ограничения.

Алгоритмы расчета целевой функции и оптимизации ЭЭН, построенные по изложенной выше методике, представлены на рис. 2 и рис. 3.

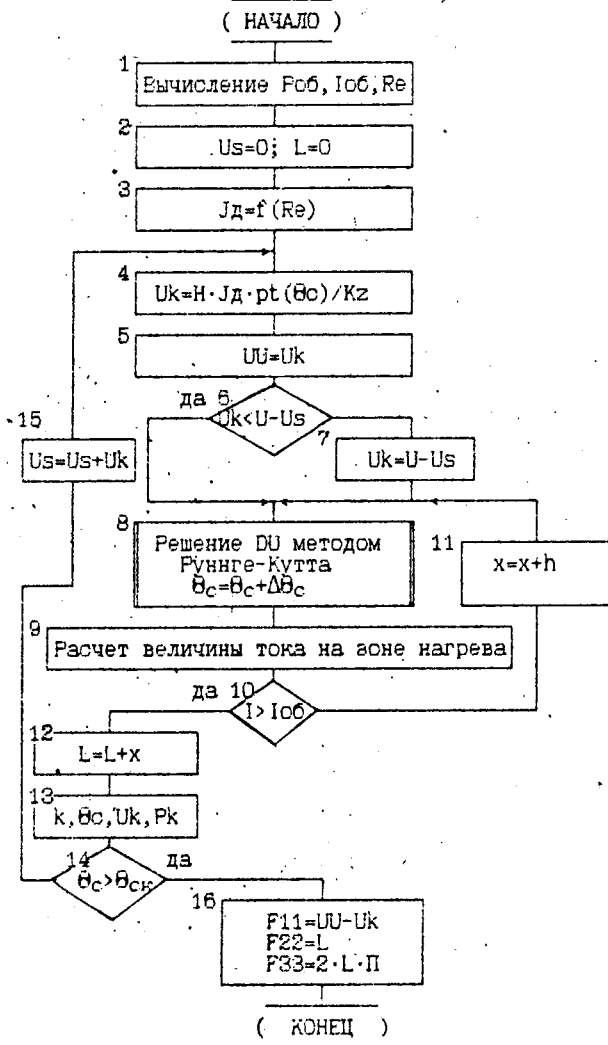


Рис. 2. Блок - схема алгоритма расчета целевой функции оптимизации

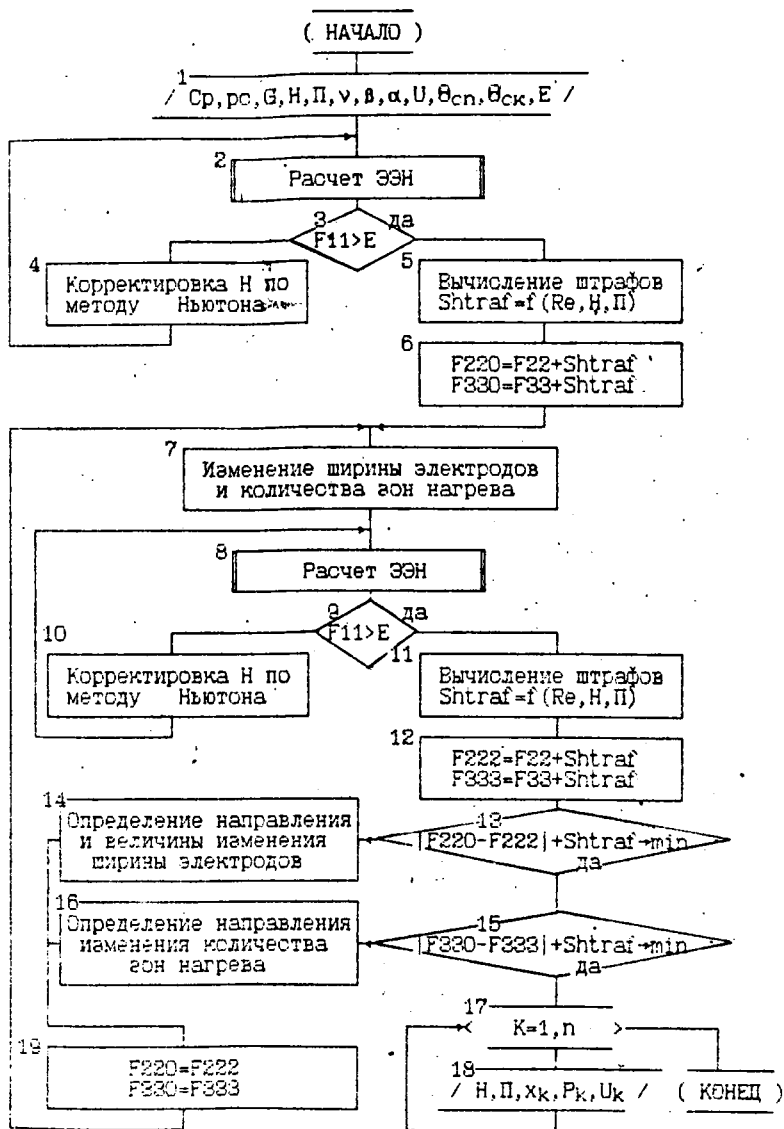


Рис. 3. Блок - схема оптимизации ЭЭН пастеризатора молока.