

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРУБ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА

1. ВВЕДЕНИЕ

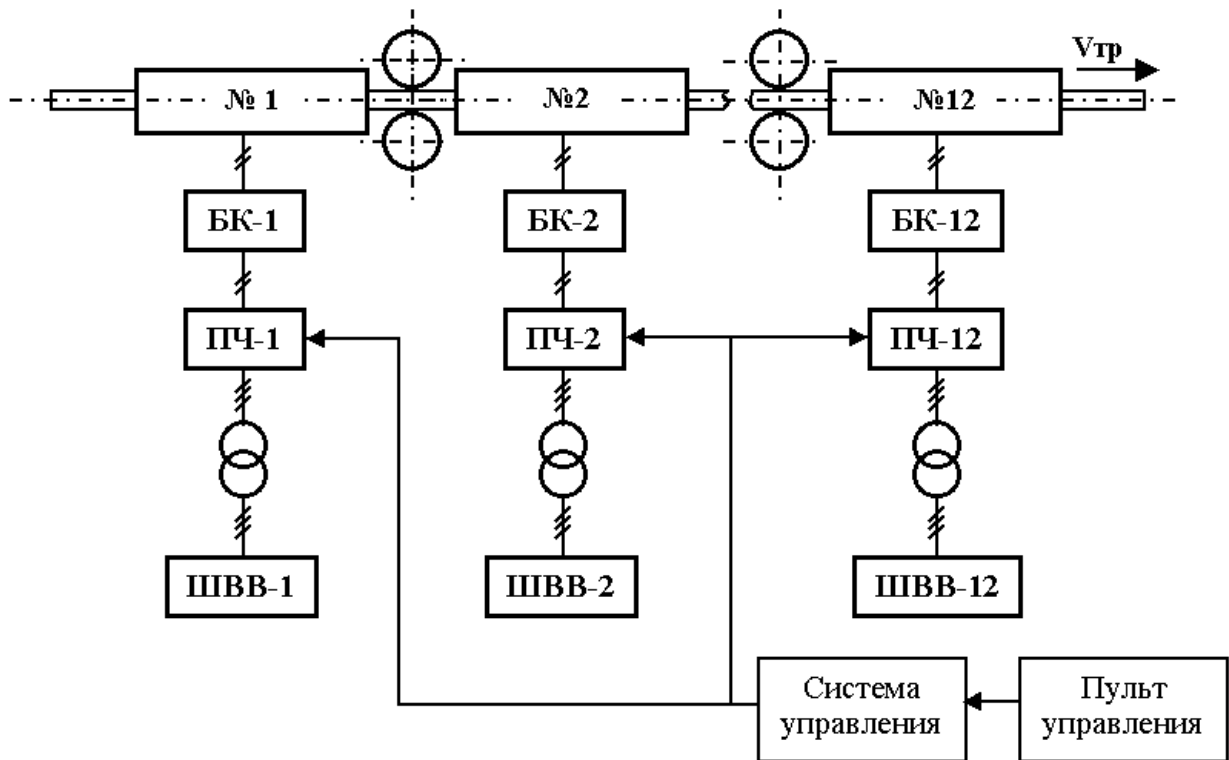
Нагрев черновых труб для проведения технологического процесса прокатки осуществляется в две стадии. На первом этапе нагрев осуществляется в газовых печах. Нагрев с помощью сжигания природного газа наиболее экономичен при нагреве до температуры примерно 500°C . При этом нагрев осуществляется с помощью процесса теплопередачи от внутреннего пространства печи к поверхности трубы и далее во внутренние слои трубы. На втором этапе нагрев проводится в индукционной проходной печи (до температуры 1100°C). В этом случае тепло выделяется внутри самой трубы и потери тепловой энергии в окружающую среду значительно ниже. В случае если температура нагрева стальной трубы превышает точку Кюри эффективность нагрева еще более повышается, поскольку материал трубы теряет магнитные свойства и глубина проникновения электромагнитного поля в металл увеличивается.

Точность нагрева труб в газовой печи невелика. Разброс температуры нагретых труб может достигать 100-200, а иногда и более градусов по Цельсию. При этом также имеется значительный разброс по температуре для участков одной и той же трубы. При ручном регулировании температуры, которое в настоящее время осуществляется на ТПА с непрерывными станами, не удастся существенно снизить разброс температур по длине черновых труб. Разброс температур по длине черновых труб на выходе из индукционной печи составляет $70-100^{\circ}\text{C}$, в то время как по требованиям технологического процесса разброс температур не должен превышать $\pm 30^{\circ}\text{C}$. Наличие таких резких перепадов температур по длине черновых труб при их редуцировании увеличивает поле разброса по геометрическим параметрам готовых труб, структуре и механическим свойствам металла, а также ведет к перерасходу электроэнергии из-за перегрева отдельных участков черновой трубы. Кроме того, черновая труба имеет утолщения на переднем и заднем концах. Для того, чтобы при последующей прокатке нивелировать эти утолщения, необходимо данные участки нагреть до более высокой температуры. В этом случае более нагретые участки трубы обладают большей пластичностью и, следовательно, подвергаются большей деформации при последующей прокатке. Таким образом, установка индукционного нагрева должна не просто стабилизировать температуру по длине трубы, но и обеспечивать нагрев трубы в соответствии с требуемым законом распределения температуры по длине трубы (повышенный нагрев заднего и переднего утолщенных концов труб).

Поставленная задача может быть решена только путем автоматизации управления индукционной установкой подогрева труб.

2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

Установка индукционного нагрева труб в целом включает в себя 12 индукторов. Нагрев трубы в каждом индукторе осуществляется на 50°C . Это связано с тем, что более сильный нагрев может привести к локальным деформациям трубы. Кроме того при одномоментном сильном нагреве распределение температуры по сечению трубы оказывается не равномерным, что также может привести к деформации трубы.



БК – блок компенсации реактивной мощности

ПЧ- преобразователь частоты

ШВВ – шкаф высоковольтного ввода

Рис.1. Структурная схема установки

Первые 5 индукторов из них питаются напряжением частотой 1000 Гц и обеспечивают нагрев трубы до температуры, равной точке Кюри. Оставшиеся 7 индукторов питаются напряжением частотой 2400 Гц и нагревают трубы до температуры, требуемой условиями технологии. Для отработки системы автоматизации возможно выполнить модернизацию двух или четырех последних в технологическом цикле индукторов.

3. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Для исследования установки индукционного нагрева разработана совмещенная электромагнитно-тепловая модель индуктора совместно с нагреваемым телом.

Рассматриваемая цилиндрическая, многослойная модель обобщенной конструкции индукционного нагревателя (см. рисунок 2), содержит произвольное число ортотропных слоев внутри активного слоя A и произвольное число слоев снаружи этого слоя. Размеры и характеристики каждого слоя заданы. Область n' безгранична (окружающее нагреватель воздушное пространство). Модель считается бесконечно длинной (в направлении координаты z), что справедливо, поскольку длина трубы значительно превышает длину индуктора. Сторонние токи замыкаются по концентрическим окружностям активного слоя и имеют только φ -ю составляющую. В общем случае каждая область характеризуется усредненными свойствами в направлении координатных осей.

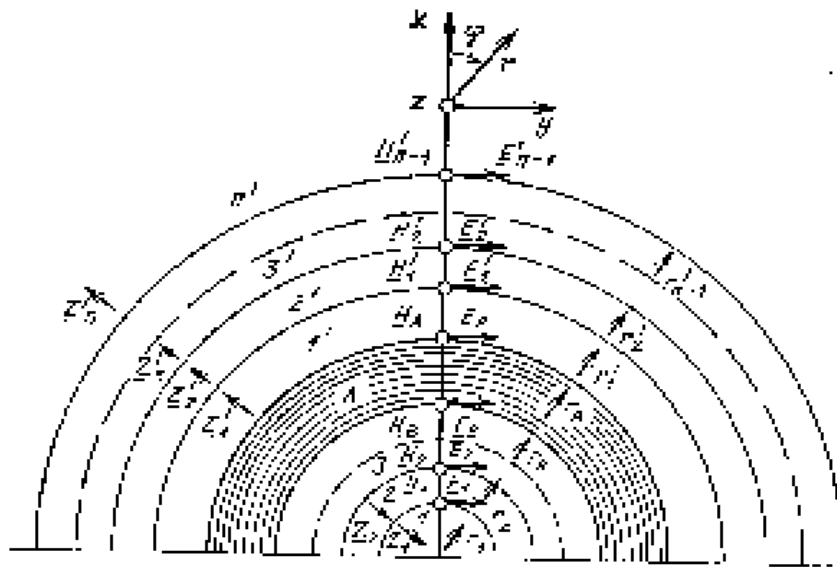


Рис. 2. Многослойная модель индукционного нагревательного устройства

Электромагнитное поле в бесконечно длинной модели представляет собой бегущую монохроматическую волну. Поток энергии, пересекающей границы областей, следы которых показаны на рисунке 2 виде концентрических окружностей, может быть определен при помощи амплитуд тангенциальных напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей, причем электрическая напряженность E имеет всего одну (φ -ю составляющую), а магнитная напряженность H_m имеет аксиальную и радиальную составляющие:

Согласно [1] такой конструкции соответствует каскадное включение четырехполюсников (Рис.3). На входе четырехполюсника с номером "k" показаны комплексные значения тангенциальных напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей, действующие на "входной" поверхности k-го слоя. В активном слое распределена плотность тока индуктора j_{mi} . В результате расчета цепи определяются мощности, поступающие в слои $S(r)_k$

и выделяющиеся в слоях $\Delta S(r)_k$, усиления, действующие на слои, КПД устройства.

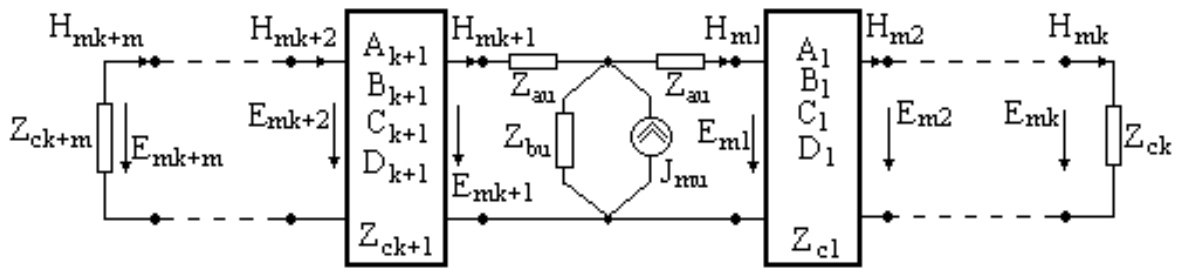


Рис. 3. Каскадное включение четырехполосников, соответствующее расчетной модели.

Выделяющиеся в слоях потери передаются в тепловую часть модели, выполненную на основе тепловых схем замещения. Тепловая часть модели рассчитывает температуры на границах слоев в каждый момент времени, и среднюю температуру по сечению трубы. Прохождение трубы через индукторы моделируется включением индуктора на время равное прохождению поперечного сечения трубы через весь индуктор.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Используя изложенную модель выполнен электромагнитный и тепловой расчет установки для двух вариантов: 1 – нагрев трубы от исходной температуры (500 C^0) до температуры равной точке Кюри, что соответствует прохождению трубы через первые 5 индукторов, и 2 – нагрев трубы от температуры равной точке Кюри до требуемой температуры (1080 C^0). Ниже приведены результаты расчетов для трубы диаметром 90 мм и толщиной стенки 7,2 мм.

Для первого варианта линейная токовая нагрузка A составила $1,6 \cdot 10^6$ А/м, при частоте 1000 Гц. Для второго варианта – $A=1,3 \cdot 10^6$ А/м, при частоте 2400 Гц.

На Рис. 4, 5 показаны распределения потерь по толщине стенки трубы для первого и второго вариантов, соответственно.

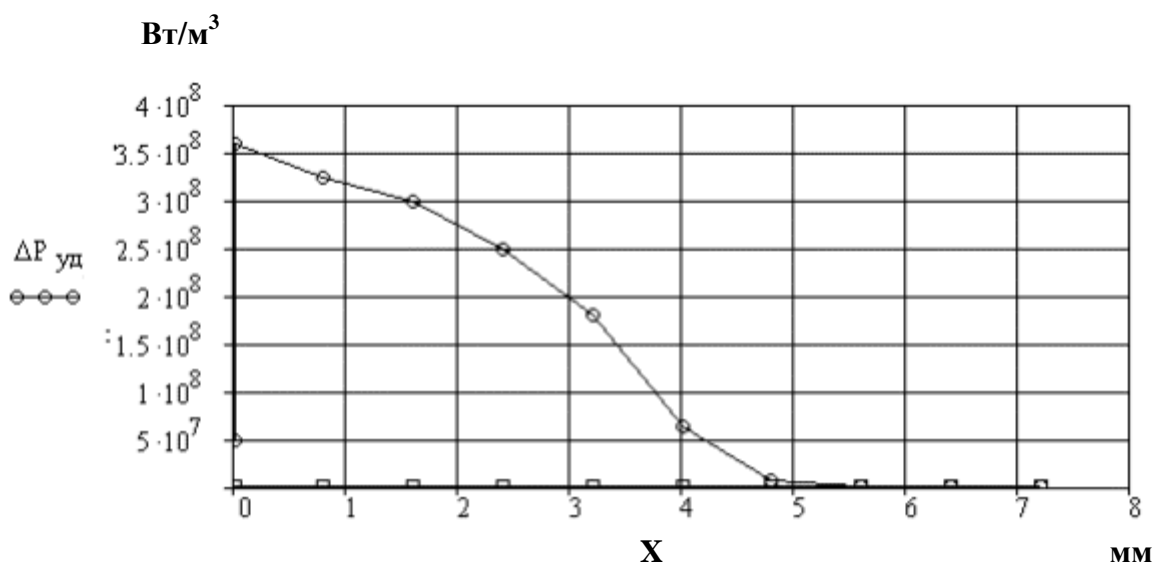


Рис.4. Удельные (на единицу объема) потери по толщине стенки трубы при нагреве трубы до 500 С⁰

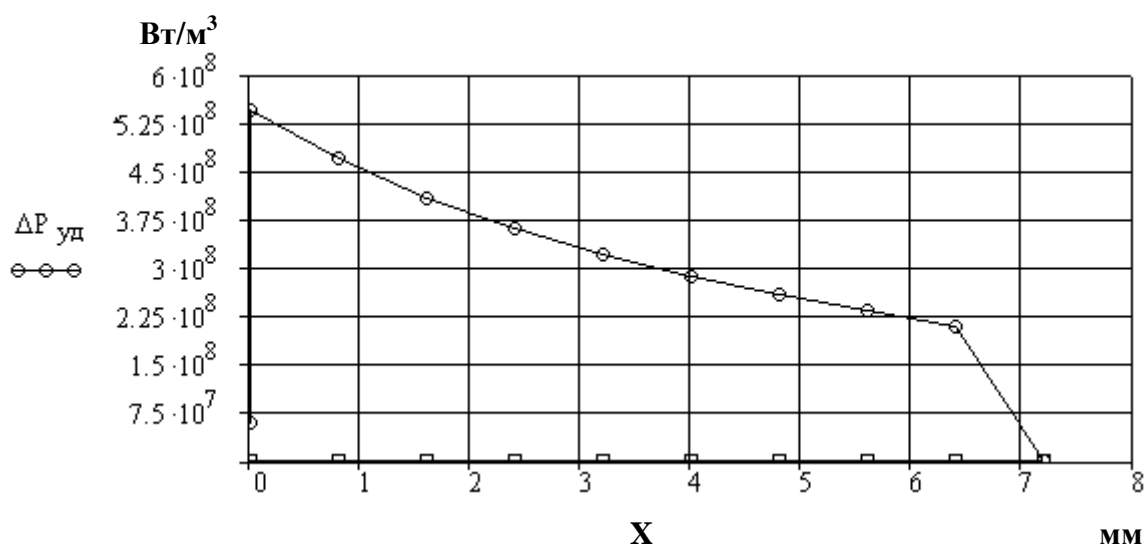


Рис.5. Удельные (на единицу объема) потери по толщине стенки трубы при нагреве трубы до 750 С⁰

Как видно из рисунка 4 в первом случае глубина проникновения электромагнитной волны в металл не достаточна для прогрева трубы по всей толщине стенки и прогрев внутренних слоев осуществляется за счет теплопередачи. Во втором варианте материал трубы вследствие нагрева потерял магнитные свойства и глубина проникновения увеличилась, что позволяет прогревать трубу по всей толщине стенки. Таким образом, для эффективного нагрева необходимо выбирать разные частоты тока для разных групп индукторов.

На рисунке 6 показан график изменения средней температуры стенки трубы при прохождении первых пяти индукторов (скорость 3 м/с).

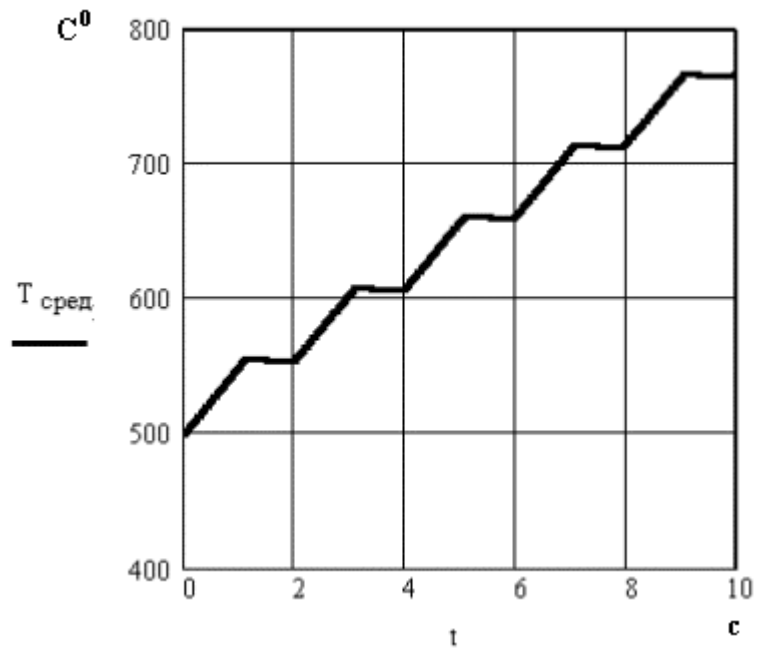


Рис.6 Изменение температуры стенки трубы при прохождении первых пяти индукторов

На рисунках 7 и 8 укрупнено показаны графики изменения температуры на границах по слоев трубы. Толщина каждого слоя принята 0,8 мм. Всего 9 слоев.

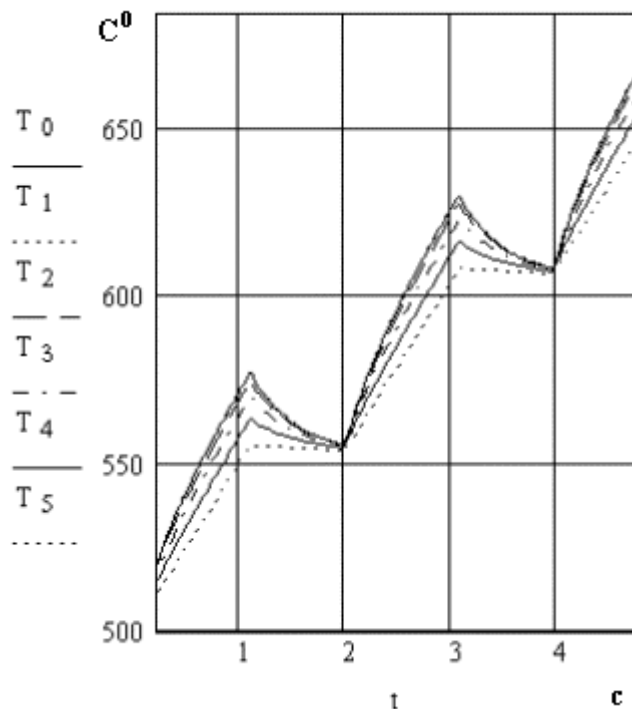


Рис.7. Изменение температуры первых пяти границах слоев трубы

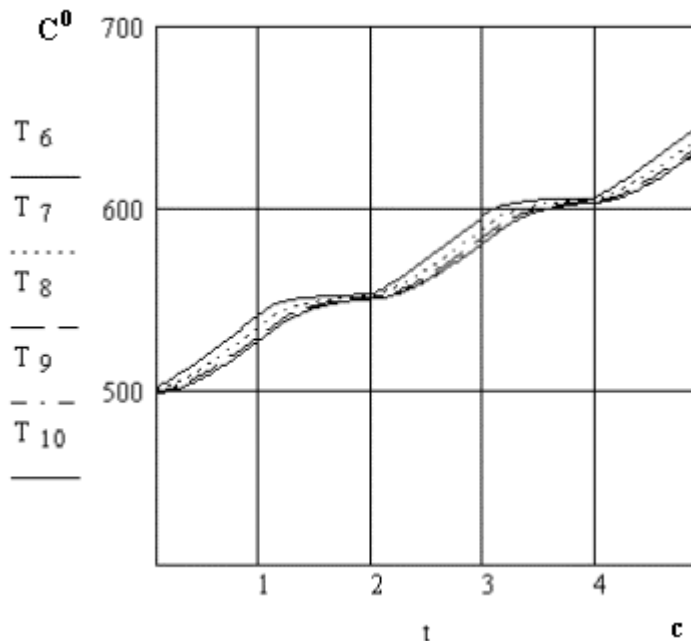


Рис.8. Изменение температуры на последних пяти границах слоев трубы

Как видно из рисунков 7 и 8 сильно нагревающиеся первые слои быстро отдают тепло во время пауз внутренним слоям, поскольку внутренние слои не прогреваются столь же интенсивно, что и внешние вследствие малой глубины проникновения электромагнитной волны в металл. Таким образом расстояние между индукторами должно быть выбрано таким образом, чтобы за время прохождения нагретого участка трубы между индукторами обеспечить выравнивание температуры по толщине стенки трубы.

На рисунке 9 показан график изменения средней температуры стенки трубы при прохождении оставшихся семи индукторов (скорость 3 м/с).

Потеря трубой магнитных свойств в этом случае позволяет увеличить частоту питающего тока индукторов и снизить амплитуду тока для обеспечения требуемой температуры нагрева.

Основным критерием является задание температуры нагрева и равномерность прогрева трубы по сечению. результаты расчета показывают, что при мощности каждого индуктора 1МВт обеспечивается нагрев до заданной температуры при скорости движения трубы 3 м/с, а также происходит выравнивание температуры по сечению за время прохождения участков трубы между индукторами. что важно для качества конечной продукции.

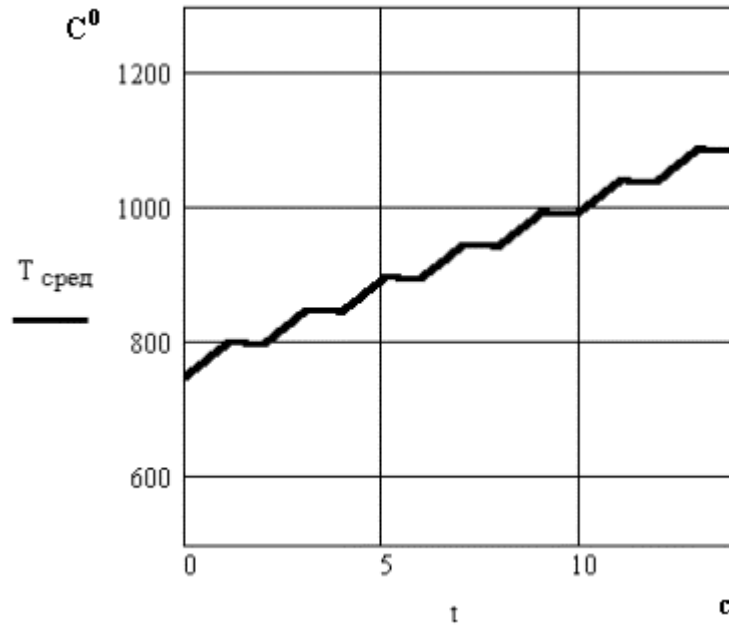


Рис.9. Изменение температуры трубы при прохождении последних семи индукторов.

5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВА

5.1. Система управления для варианта нагревательной установки из 4 индукторов.

В состав системы управления входят датчики температуры, сканирующие трубу по длине, блоки управления нагревом (БУН), включающие полупроводниковый преобразователь энергии (ПЭ) и вычислительные элементы, а также блок распределения задания.

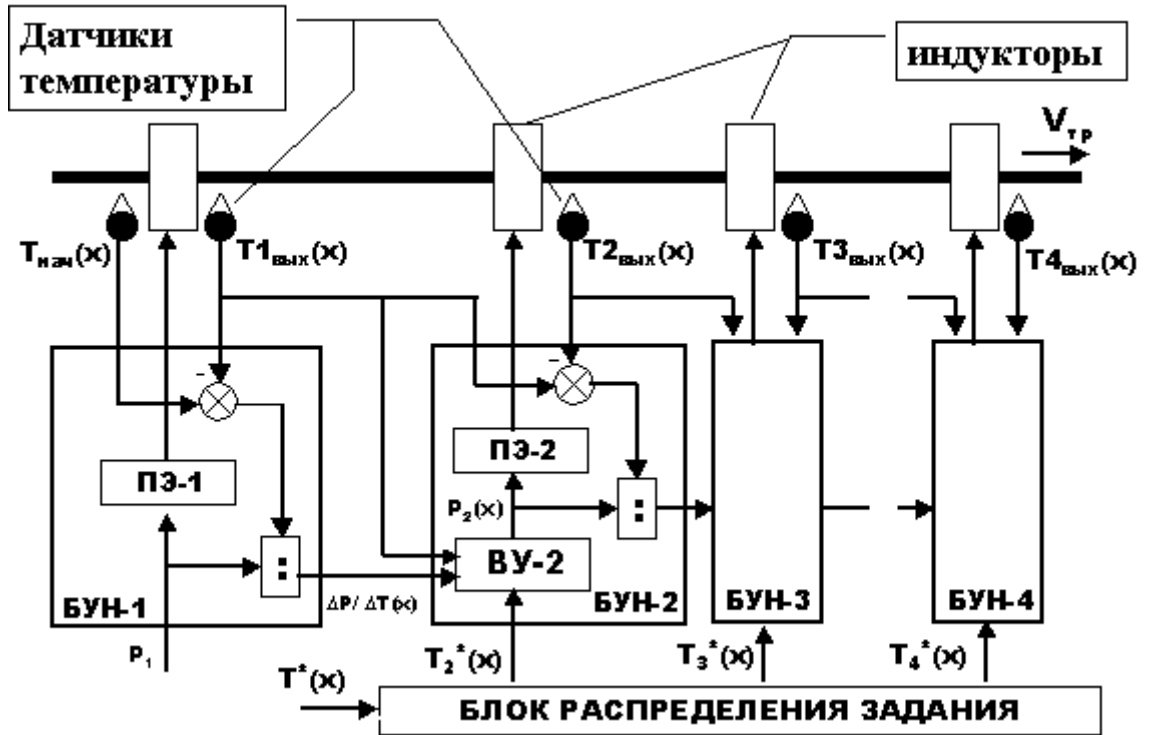


Рис.10. Структурная схема установки с системой управления

5.1.1. Система измерения

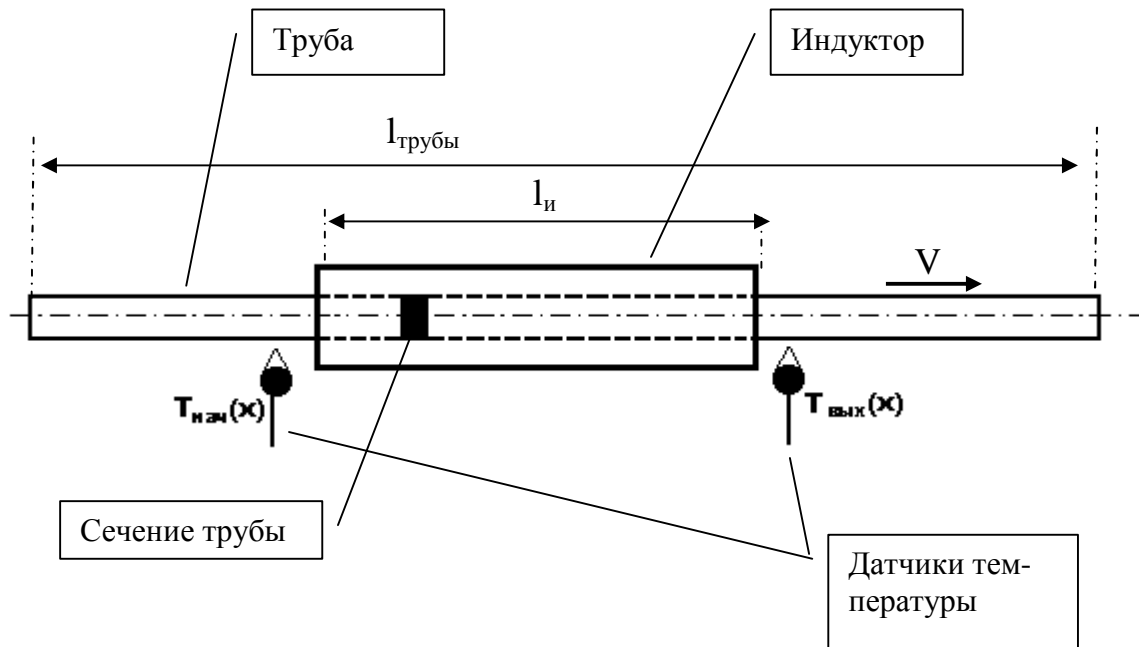


Рис.11. Труба при прохождении через индуктор

5.1.1.1. Для каждого сечения трубы определяется температура до входа в индуктор ($T_{нач}$) и после выхода из индуктора ($T_{вых}$). Таким образом формируются

мируются два вектора температур характеризующие распределение температуры по длине трубы до ($T_{нач}(x)$) и после нагрева ($T_{вых}(x)$).

5.1.1.2. За время прохождения каждого сечения трубы внутри индуктора определяется энергия затрачиваемая на нагрев данного сечения трубы

$$W = \int_0^{t_n} P(t) dt, \quad (1)$$

где $P(t)$ – активная мощность потребляемая индуктором за время прохождения одного сечения трубы через индуктор,

t_n – время прохождения одного сечения трубы через индуктор.

5.1.1.3. Определяется средняя мощность индуктора при нагреве данного сечения трубы

$$P_{cp} = \frac{W}{t_n} \quad (2)$$

5.1.1.4. Определяется конструктивный коэффициент трубы для данного сечения трубы

$$K = \frac{P_{cp}}{T_{вых} - T_{нач}}. \quad (3)$$

Коэффициент показывает, какова должна быть мощность индуктора для нагрева текущего сечения трубы на 1°C при данной (постоянной) скорости движения трубы. В результате формируется вектор значений конструктивного коэффициента для всей трубы, который используется для вычисления мощности нагрева на последующем индукторе и является основой всего алгоритма управления процессом нагрева.

5.1.2. Расчет графика подаваемой в индуктор мощности

5.1.2.1. Для формирования заданного закона распределения температуры по длине трубы необходимо сформировать график распределения мощности по длине трубы при прохождении ее через индуктор.

На первом этапе определяется график распределения ошибки по температуре ΔT по длине трубы как разность между заданной температурой $T_{зад}$ и фактической, измеряемой на выходе предыдущего индуктора $T_{ф}$.

$$\Delta T = T_{зад} - T_{ф}. \quad (4)$$

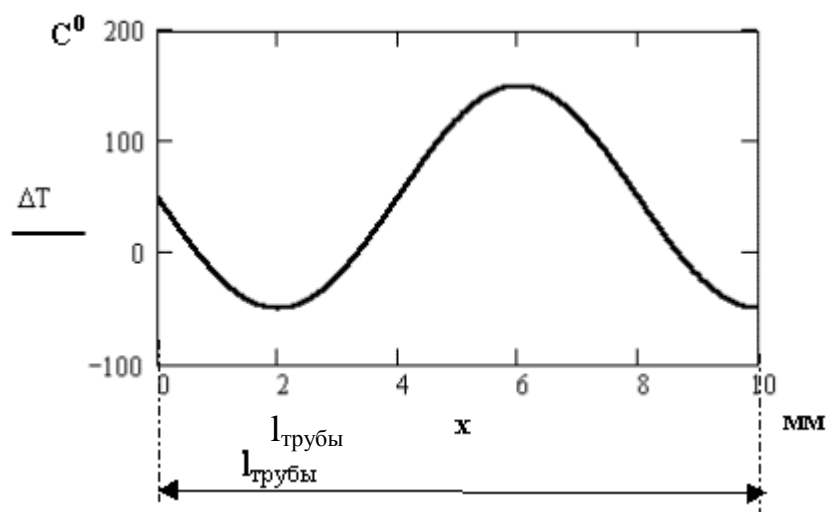


Рис.12. График ошибки по температуре по длине трубы

5.1.2.2. Определяется график требуемой мощности по длине трубы как произведение конструктивного коэффициента трубы на ошибку по температуре для каждого сечения трубы:

$$Q = K \cdot \Delta T . \quad (5)$$

5.1.2.3 Определяется график усредненной требуемой мощности по длине трубы.

Поскольку длина индуктора не является бесконечно малой, то в зоне нагрева оказываются несколько сечений трубы, которые могут быть нагреты по разному. Следовательно, необходимо выбрать такое значение мощности подаваемой в индуктор для каждого момента времени (или, что то же самое, для каждого расположения индуктора относительно трубы) при которой будет обеспечиваться минимальная ошибка по температуре. Этого можно достичь выполняя усреднение графика требуемой мощности на интервале равном длине индуктора для каждого варианта расположения трубы относительно индуктора. На участках (при входе трубы в индуктор и при выходе) где индуктор не полностью занят трубой, усреднение мощности выполняется только на интервале длины индуктора занятом трубой.

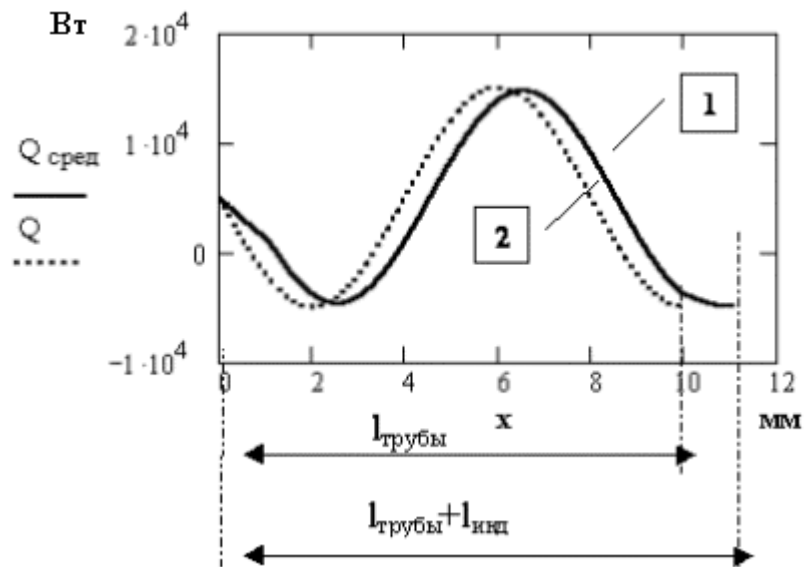


Рис.13. Графики распределения требуемой мощности Q (2) и усредненной требуемой мощности $Q_{\text{сред}}$ (1)

5.1.2.4. Определяется график мощности задания индуктора $Q_{\text{зад}}$. Из графика усредненной требуемой мощности $Q_{\text{сред}}$ удаляются участки имеющие отрицательный знак. На этих участках мощность индуктора равна нулю.

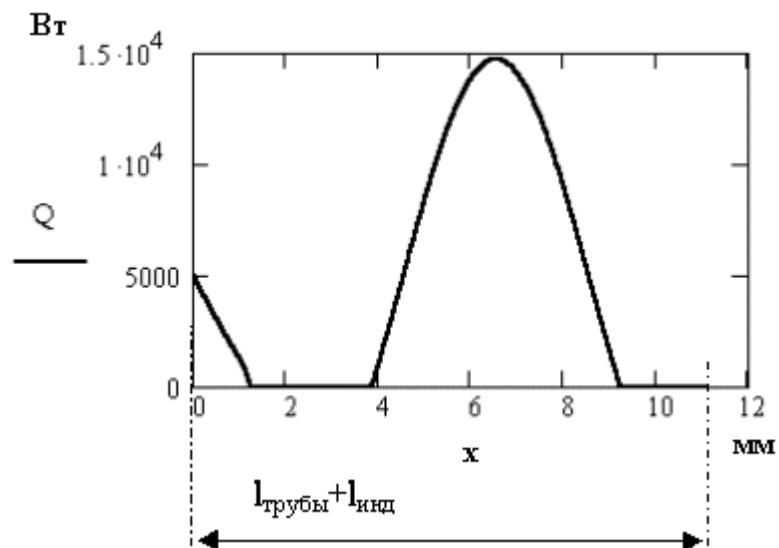


Рис.14. Мощность задания индуктора

Ниже представлены упрощенные алгоритмы программ реализующих описанный принцип.

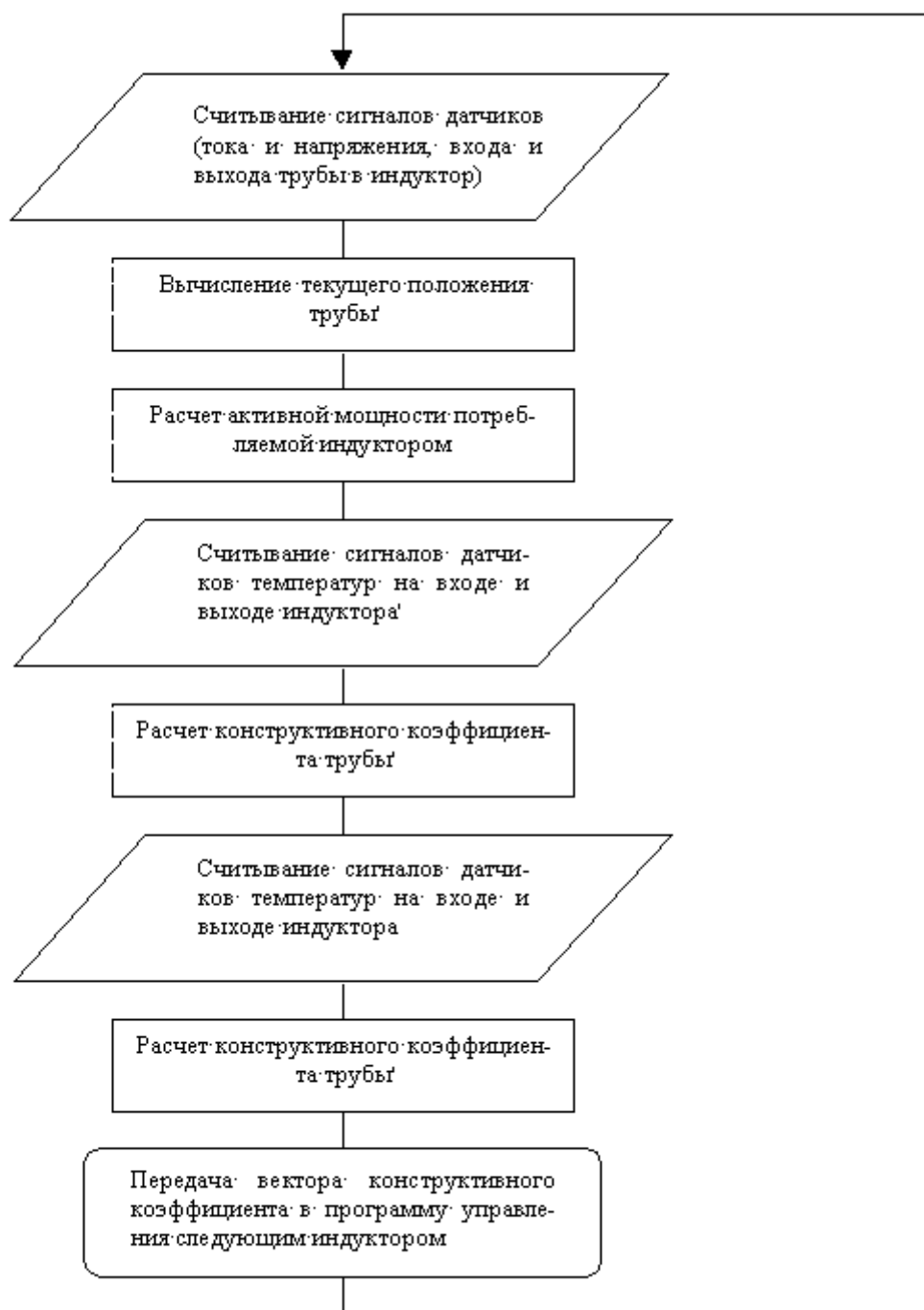


Рис. 15. Алгоритм программы управления первым индуктором

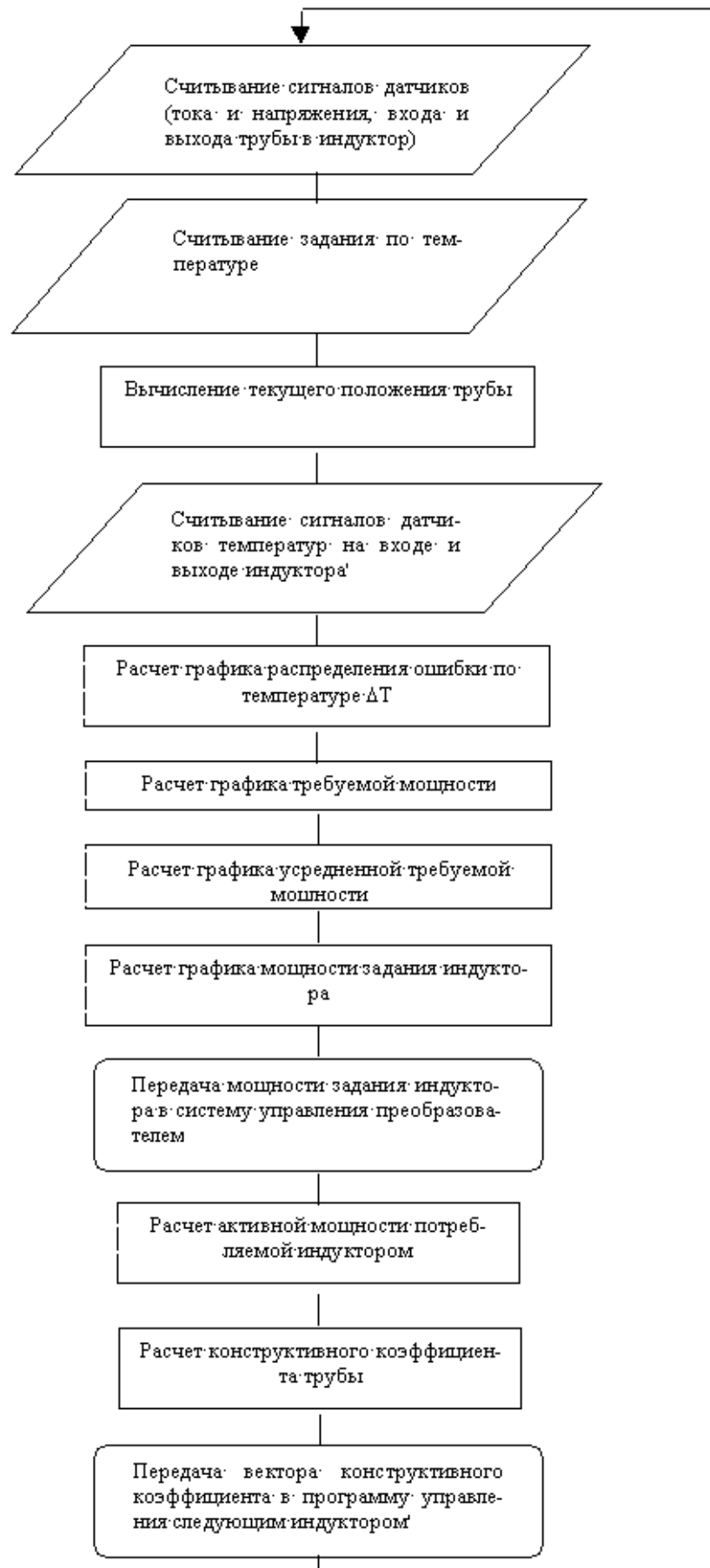


Рис.16. Алгоритм программы управления вторым или последующими индукторами

Результаты расчетов нагрева трубы в соответствии с заданным законом распределения температуры по длине приведены на Рис. 17,18.

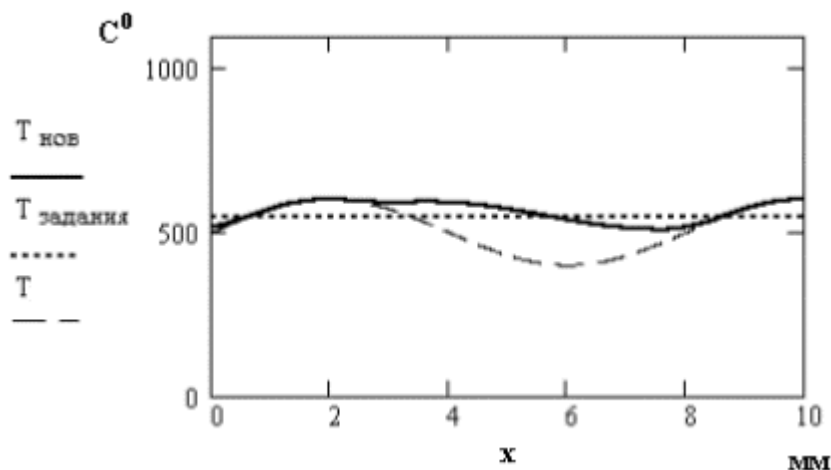


Рис.17. Изменение распределения температуры трубы после прохождения второго индуктора

T – исходное распределение температуры трубы,
 $T_{задания}$ - требуемое распределение температуры трубы,
 $T_{нов}$ - распределение температуры трубы после прохождения первого индуктора

Из графиков рис.17 видно, что разброс исходной температуры трубы ± 100 $^{\circ}\text{C}$ уменьшается до ± 45 $^{\circ}\text{C}$. При этом эффективность выравнивания температуры при заданном исходном распределении зависит от длины индуктора и повышается при уменьшении длины индуктора. Аналогичным образом происходит выравнивание температуры при прохождении последующих индукторов. На рис. 18, для примера, показаны распределение температуры по длине трубы после прохождения третьего индуктора. Разброс распределения температуры в этом случае составляет ± 28 $^{\circ}\text{C}$. Таким образом, с помощью 4 модулей можно осуществить нагрев трубы в соответствии с требованиями технологического процесса.

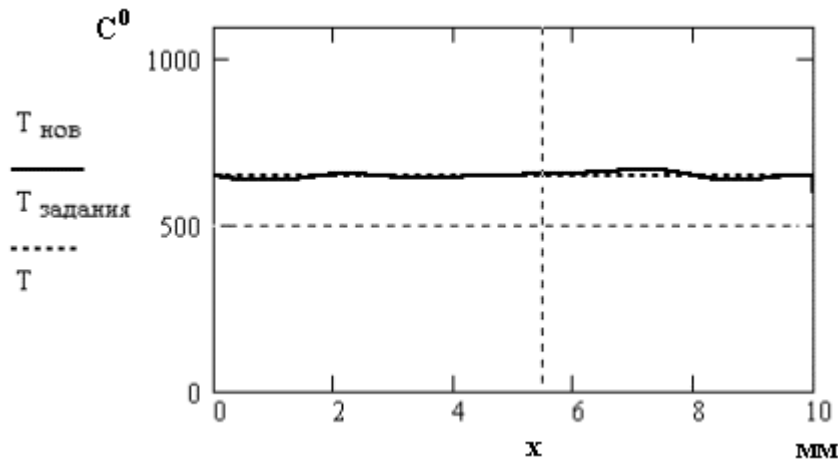


Рис.18. Изменение распределения температуры трубы после прохождения третьего индуктора

5.1 Система управления для варианта нагревательной установки из 2 индукторов.

В случае использования установки из двух индукторов целесообразно с точки зрения повышения точности нагрева дополнить систему управления первым индуктором локальной системой регулирования температуры с использованием обратной связи по температуре. Схема модели такой системы регулирования, выполненная в программе SIMULINK, показана на рис. 19.

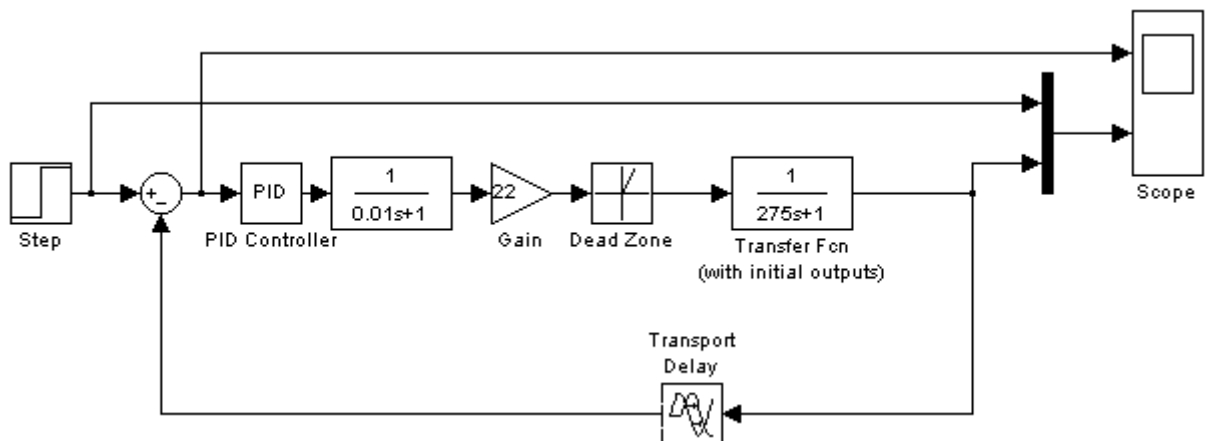


Рис.19 Модель локальной системы регулирования температуры.

Объект управления в модели представлен апериодическим звеном с постоянной времени равной постоянной времени нагрева трубы. Последовательно, перед объектом включено нелинейное звено учитывающее однонаправленный характер объекта (трубу в индукторе можно только нагревать, а охлаждение осуществляется естественным образом). Преобразователь энергии

представлен последовательно включенными апериодическим звеном и усилителем. В качестве регулятора выбран ПИД-регулятор, коэффициент при интегральной части которого задается равным нулю, т.е. реализуется закон пропорционально-дифференциального управления. Линия задержки в сигнале обратной связи учитывает реальное запаздывание сигнала обратной связи, поскольку индуктор и датчик температуры разнесены в пространстве.

Ниже представлен упрощенный алгоритм программы реализующей локальное регулирование температуры:



Рис.20. Алгоритм программы локального регулирования температуры

Алгоритм работы программы управляющей вторым индуктором аналогичен алгоритму программы управляющей вторым индуктором системы состоящей из 4 индукторов.

При использовании установки из двух индукторов возможности формирования заданного закона распределения температуры по длине трубы ограничены. Так при разбросе температуры $\pm 100^{\circ}\text{C}$ на выходе второго индуктора разброс составляет 46°C .

Таким образом рассматриваемые системы управления обеспечат нагрев трубы до заданной температуры в соответствии с требуемым законом распределения температуры по длине трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-256 с.