

## УСТРАНЕНИЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

В.А. Ганиев <sup>1</sup>, инженер, начальник электролаборатории рег. №53-015-22

Научный руководитель: А.А. Базаров <sup>2</sup>, д-р техн. наук, доцент

<sup>1</sup>ИП Ганиев В.А.

<sup>1</sup>(Россия, г. Нефтегорск)

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup>(Россия, г. Самара)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-4-1-73-76

**Аннотация.** В данной публикации рассмотрены вопросы компьютерного моделирования электромагнитных и тепловых процессов, связанных с протеканием наведенных токов в металлических элементах технологической конструкции. Линия между источником питания и плавильной индукционной установкой выполнена в виде двух медных проводников, заключенных в шланг с проточной водой для охлаждения. На отдельных участках трасса проходит слишком близко от массивных стальных элементов, что приводит к их нагреву вихревыми токами. Моделирование разных вариантов линии показало наиболее приемлемый способ решения проблемы с помощью экранирования стальных элементов алюминиевыми листами.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, численный расчет, потери мощности, электромагнитный экран.

Было проведено исследование теплового процесса в системе проводников, подключенных к тигельной индукционной печи, и в металлическом настиле эстакады. Участок линии от преобразователя частоты до индуктора выполнен в виде одиночных проводников, помещенных в резиновый шланг, через который циркулирует вода для обеспечения отвода тепла. В металлических элементах конструкции эстакады, особенно в листах настила, наводятся токи, что приводит к их нагреву [1, 2]. Водоохлаждаемые проводники проложены под металлическим настилом с небольшим зазором. Для их функционирования помех нет, но высокая температура настила создает проблемы для технического персонала, участвующего в технологическом процессе. Проект нагревательной установки выполнен с нарушениями ПУЭ в части соблюдения необходимых зазоров между токоведущими элементами и металличе-

скими конструкциями. Для определения параметров процесса нагрева выполнены электромагнитные и тепловые расчеты, по результатам которых предложены меры по приведению в соответствие действующим техническим нормам условий труда и снижению непроизводительных затрат электроэнергии. Задачи были решены с помощью программного комплекса Comsol.

Для моделирования тепловых и электромагнитных процессов используется программный комплекс Comsol [3], построенный на основе метода конечных элементов. Математической базой являются дифференциальные уравнения в частных производных.

Рассмотренные выше модели электромагнитной и тепловой задач формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) = \left( \frac{\sigma V_{sum}}{2\pi r} + \mathbf{J}_\varphi^e \right); \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q. \quad (2)$$

Они дополнены граничными условиями (3) и (4). Связь между процессами обеспечивается через электропроводность  $\sigma$  в уравнении (1), зависящую от температуры, и через источники тепла  $Q$  в уравнении (2).

В качестве граничных условий для электромагнитной задачи задано нулевое значение векторного магнитного потенциала (3). Для тепловой задачи имеет место конвективный теплообмен (4) ввиду незначительности потоков лучистого теплообмена.

$$A_\varphi = A_{0\varphi}; \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_n - T_{oc}) \quad (4)$$

Здесь:  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $\mathbf{J}_\varphi^e$  – вектор плотности внешнего тока;  $\sigma$  – электропроводность материала;  $\rho$  – плотность материала;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $V_{вит}$  – потенциал витка;  $\varphi$  – сдвиг по фазе вектора тока относительно напряжения;  $h$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $C_p$  –

удельная теплоемкость материала;  $T_n$ ,  $T_{oc}$  – температура настила и окружающей среды.

Кривая намагничивания задается в упрощенном виде и соответствует литой стали.

В компактной форме выражения (1) и (2) объединяются в систему уравнений, которая решается для поиска распределения мощности и температуры в настиле.

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{K}_I] \{I\} = \{Q_I\}; \\ [\hat{K}_T] \{T\} = \{Q_T\}. \end{array} \right. \quad (5)$$

В уравнениях системы содержатся матрицы жесткости, векторы переменных и векторы источников.

Проведены расчеты для нескольких вариантов расположения проводников относительно настила и для разных материалов настила. Результаты представлены в таб-

лице 1 и на рисунке 1. Размеры расчетной области приняты равными одному квадратному метру. Ток линии принят равным 3500 А, так как на данном участке протекает нескомпенсированный ток колебательного контура.

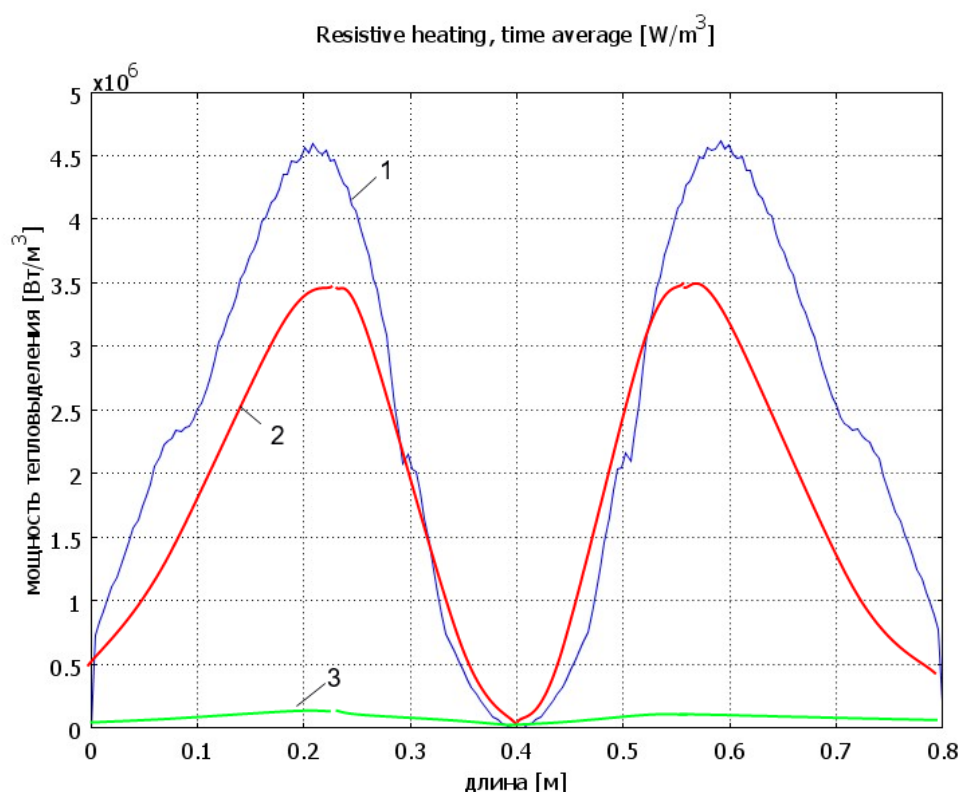


Рис. 1. Диаграммы мощности тепловыделения на нижней поверхности настила:

1 – стальной настил, расстояние между проводниками 300 мм; 2 – стальной настил, расстояние между проводниками 200 мм; 3 – алюминиевый настил, расстояние между проводниками 200 мм.

Таблица 1. Расчетные параметры линии питания плавильного индуктора

№	$\Delta h$ , м	$\Delta x$ , м	$U$ , В	$I$ , А	$P_{Fe}$ , Вт	$P_{Al}$ , Вт	$T$ , °С
1	200	200	10	3400	325	-	45
2	200	300	10	3000	500	-	72
3	200	200	10	3500	1	14,8	1,8

Как видно из таблицы, мощность тепловыделения зависит от соотношения расстояния между проводниками в горизонтальной плоскости и расстоянием между проводниками и настилом в вертикальной плоскости. Согласно ПУЭ следует обеспечивать расстояние между проводником с током и металлоконструкциями не менее 200 мм. Несоблюдение этого требования привело к чрезмерному нагреву настила. Для снижения мощности тепловыделения в настиле применен алюминий, как обладающий высоким коэффициентом электропроводности. Результатом стало резкое уменьшение мощности тепловыделения и температуры.

Менее затратным способом решения проблемы является изменение расположения проводников. Однако это справедливо на стадии проектирования. Изменение конструкции водоохлаждаемого проводника обойдется дороже, чем установка экранирующего листа из алюминиевого сплава.

**Заключение.** Проведен анализ электромагнитных и тепловых процессов на участке линии между индуктором и преобразователем частоты, и выполнены расчеты вариантов, позволяющие решить проблему нагрева металлических элементов конструкции. Таким образом, улучшены условия труда и снижены потери электроэнергии в линии.

**Библиографический список**

1. Слухоцкий А.Е., Немков В.С. и др. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. – 2-е изд., доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 104 с., ил.
3. Simulate real-world designs, devices, and processes with multiphysics software from COMSOL. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.comsol.com/> (дата обращения: 02.04.2023).

**ELIMINATION OF HEATING OF THE METAL STRUCTURE IN THE WORKING AREA OF THE MELTING FURNACE**

**V.A. Ganiev**<sup>1</sup>, *Engineer, head of the electrical laboratory reg. № 53-015-22*

**Supervisor: A.A. Bazarov**<sup>2</sup>, *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor*

**<sup>1</sup>Individual entrepreneur Ganiev V.A.**

**<sup>1</sup>(Russia, Neftegorsk)**

**<sup>2</sup>Samara State Technical University**

**<sup>2</sup>(Russia, Samara)**

***Abstract.** In this publication, the issues of computer modeling of electromagnetic and thermal processes associated with the flow of induced currents in metal elements of technological design are considered. The line between the power supply and the melting induction unit is made in the form of two copper conductors enclosed in a hose with running water for cooling. In some sections, the track passes too close to massive steel elements, which leads to their heating by eddy currents. Modeling of different variants of the line showed the most acceptable way to solve the problem by shielding steel elements with aluminum sheets.*

***Keywords:** induction heating, numerical calculation, power loss, electromagnetic shield.*