

УДК 621.365.51 : 621.43.046.29 : 621.315.617.4

Р.Г. Калинин, В.Д. Семенов, В.А. Федотов

## Эффективность нагрева медного провода в зазоре индуктора поперечного магнитного поля для зачистки от лаковой изоляции

Проведен расчет эффективности нагрева участка медного провода для зачистки его от лаковой изоляции методом индукционного нагрева. Приведены кривые коэффициента полезного действия зачистки участка провода в зависимости от изменения мощности, переданной из индуктора в нагреваемое тело, и времени окончания зачистки в зависимости от изменения мощности, переданной из индуктора.

**Ключевые слова:** зачистка изоляции, индукционный нагрев, эффективность.

Для снятия изоляции с лакированных медных и алюминиевых проводов малых диаметров разработано устройство [1], работающее на принципе индукционного нагрева. Индуктор устройства выполнен с концентратором магнитного поля из феррита и наводит поперечное относительно нагреваемого объекта, магнитное поле.

Процесс зачистки эмалированного провода в поперечном магнитном поле происходит следующим образом. Проводник помещается в зазор индуктора, в котором при включении инвертора, питающего индуктор, возникает переменный магнитный поток. Изменяющееся магнитное поле индуцирует в проводнике вихревые токи (токи Фуко), вследствие которых проводник нагревается. При повышении температуры проводника до температуры разрушения изоляции  $T_k$  происходит ее отслаивание и частичное обугливание. На рис. 1 представлена функциональная схема устройства зачистки эмалированных проводов (УЗЭП) и индуктора с концентратором магнитного поля.

Здесь ИП – вторичный источник питания устройства зачистки. Полумостовой транзисторный преобразователь выполнен на ключах  $K_1$ ,  $K_2$  и емкостях  $C_1$  и  $C_2$ . Нагрузкой инвертора является последовательный резонансный контур, представленный на рисунке элементами  $C_{рез}$  и  $L$ , где  $L$  – эквивалентная индуктивность индуктора с магнитопроводом  $M$ , а  $C_{рез}$  – резонансная емкость контура. Лакированный провод помещается в зазор магнитопровода, где участок  $(a, b)$  подвергается термической зачистке. При нажатии кнопки  $K_3$  формируется пусковой импульс на систему управления (СУ), длительность которого задает время зачистки  $t_{03}$ . СУ подстраивает резонансную частоту по значению тока индуктора  $i$  на выходе трансформатора тока (ТТ).

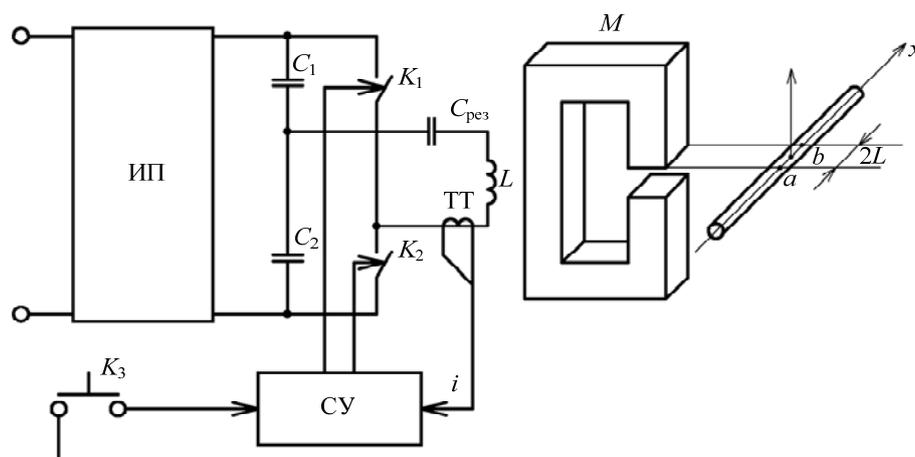


Рис. 1. Функциональная схема устройства зачистки лакированных проводов

Общий КПД устройства зачистки можно определить как произведение КПД последовательных узлов:

$$\eta = \eta_{ИП} \cdot \eta_{ИНВ} \cdot \eta_{и} \cdot \eta_{н}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – общее КПД устройства зачистки;  $\eta_{\text{ИП}}$  – КПД источника питания;  $\eta_{\text{ИНВ}}$  – КПД инвертора;  $\eta_{\text{И}}$  – КПД индуктора;  $\eta_{\text{Н}}$  – КПД передачи энергии из индуктора в нагреваемый участок провода.

Коэффициенты полезного действия источника питания  $\eta_{\text{ИП}}$  и инвертора  $\eta_{\text{ИНВ}}$  рассчитываются по известным методикам, опубликованным в технической литературе, и не являются предметом обсуждения данной работы.

КПД индуктора определяется как отношение мощности, передаваемой в нагреваемый провод, к общим тепловым потерям «системы» и выражается как

$$\eta_{\text{И}} = \frac{P_{\text{О}}}{P_{\text{О}} + P_{\text{М}} + P_{\text{ОБ}} + P_{\text{И}} + P_{\text{КОНВ}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{О}}$  – мощность, передаваемая из индуктора в нагреваемый провод;  $P_{\text{М}}$  – потери в магнитопроводе индуктора на гистерезис и вихревые токи;  $P_{\text{ОБ}}$  – потери в обмотке индуктора;  $P_{\text{И}}$  – потери на излучение от нагреваемого провода;  $P_{\text{КОНВ}}$  – конвекционные потери тепла от нагреваемого провода.

Поскольку время зачистки достаточно мало и составляет доли секунды, то потерями на излучение и конвекцию можно пренебречь. Тогда формула (2) упрощается и рассчитывается по известным методикам.

Коэффициент полезного действия передачи энергии из индуктора в нагреваемый участок определим, как отношение энергии затраченной на нагрев провода в заданной области, к общей энергии, передаваемой из индуктора в нагреваемое тело. Общая энергия  $W$ , передаваемая из индуктора в нагреваемое тело определяется произведением мощности  $P_{\text{О}}$  на время зачистки  $t_3$ :

$$W = P_{\text{О}} \cdot t_3, \quad (3)$$

Энергию, затраченную на нагрев участка провода, можно выразить как

$$W_{\text{Н}} = V \rho c \Delta T_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $V$  – объем нагреваемого провода;  $\rho$  – удельная масса материала провода;  $c$  – теплоемкость материала провода;  $\Delta T_{\text{ср}}$  – приращение средней температуры провода на нагреваемом участке.

Известно, что при нагреве проводника часть тепла кондуктивным способом (теплопроводностью) передается из области нагрева в область с меньшей температурой, что с точки зрения зачистки участка проводника нагревом является ненужными потерями. Определив распределение температуры по объему провода или его длине, можно рассчитать коэффициент полезного действия при нагреве заданного участка провода следующим образом:

$$\eta_{\text{Н}} = \frac{\int_0^L \pi R^2 c \rho T(t_3, x) dx}{P_{\text{О}} t_3}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус нагреваемого провода;  $T(t_3, x)$  – распределение температуры по длине провода в момент времени  $t_3$ .

Если нагревать один конец проводника, то тепло из области нагрева будет передаваться только в одну сторону. Если же нагревать область, удаленную от какого-либо конца, то тепло будет уходить в обе стороны, что приводит к еще большему снижению эффективности нагрева. Задача нахождения распределения температуры в проводнике при нагреве одного конца стержня описана в литературе [2]. Условие задачи сформулировано следующим образом. В области  $x > 0$  начальная температура равна нулю. В области  $0 < x < L$  при  $t > 0$  в единице объема за единицу времени выделяется постоянное количество тепла  $A_0$ . На поверхности  $x = 0$  тепловой поток отсутствует.

Распределение температуры по длине  $x$  провода в зависимости от времени  $t$  имеет следующий вид:

$$T(x, t) = \frac{\chi A_0 t}{\lambda} \left( 1 - 2i^2 \Phi\left(\frac{L-x}{2\sqrt{\chi t}}\right) - 2i^2 \Phi\left(\frac{L+x}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right), \text{ при } 0 < x < L; \quad (6)$$

$$T(x, t) = \frac{\chi A_0 t}{\lambda} \left( 2i^2 \Phi\left(\frac{x-L}{2\sqrt{\chi t}}\right) - 2i^2 \Phi\left(\frac{x+L}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right), \text{ при } x > L, \quad (7)$$

где  $A_0 = \frac{P_{\text{О}}}{2\pi R^2 L}$  – удельное количество тепла на единицу объема в единицу времени;  $\chi = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент

тепловой диффузии или коэффициент температуропроводности, характеризует изменение температуры, проходящее в единице объема вещества, обусловленное количеством тепла, протекающим в единицу времени через единичную площадку в слое единичной толщины и при единич-

ной разности температур на его поверхности.  $\lambda$  – теплопроводность (для меди 401 Вт/мК);  $c$  – теплоемкость (для меди 385 Дж/кгК);  $\rho$  – удельная масса (для меди  $8,92 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);  $i^2 \Phi^* \left( \frac{x-L}{2\sqrt{\chi t}} \right) = \int_x^{\infty} \int_x^{\infty} \Phi^*(\xi) d\xi d\xi$  и  $\Phi^*(x) = 1 - \Phi(x)$  – табулированные функции;  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$  –

функция ошибок или функция Лапласа.

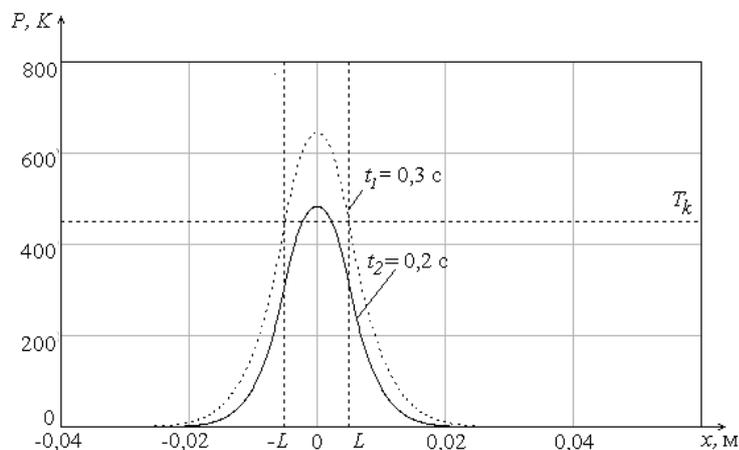


Рис. 2. Распределение температуры в медном проводнике диаметром 0,3 мм в течение 200 и 300 мс

изоляция. Данное условие обеспечивает полное разрушение изоляции в области (a, b), т.е. зачистку. Примем для изоляции провода ПЭТВ  $T_{кПЭТВ} = 450$  °С.

Решая уравнение  $T(t, x=L) = T_{кПЭТВ}$  численным методом при  $t = t_3$ , находим время зачистки  $t_3$ .

На рис. 3 приведены результаты вычисления КПД нагрева  $\eta_n$  (зачистки) участка проводника длиной 10 мм, диаметром 0,3 мм и времени зачистки при изменении мощности  $P_0$ .

Из графиков видно, что с повышением мощности  $P_0$ , передаваемой из индуктора в нагреваемое тело, КПД  $\eta_n$  растет, а время зачистки  $t_3$  снижается. Данные зависимости позволяют определить время, за которое будет достигнута температура разрушения изоляции на заданном участке провода при заданной мощности, и оценить КПД участка нагрева, либо определить мощность, которую необходимо передать из индуктора в зачищаемый провод для обработки участка заданной длины при требуемом времени зачистки.

#### Литература

1. Калинин Р.Г. Индукционное устройство для зачистки лакированных проводов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тезисы докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов / ОАО «НПЦ «Полюс». – Томск, 2013. – 268 с.
2. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел: пер. со второго англ. изд. / Г. Карслоу, Д. Егер; ред. пер. А.А. Померанцев. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

Данное решение справедливо для случая неограниченного твердого тела, в котором тепло выделяется в полосе длиной  $2L$ . На рис. 1 длина участка провода, обозначенная (a, b), равна  $2L$ . На рис. 2 приведены примеры распределения температуры в медном проводнике диаметром 0,3 мм при нагреве области (a, b) длиной  $2L = 10$  мм источником, обеспечивающим вложения в тело  $P_0 = 800$  Вт/м, в моменты времени  $t_1 = 0,2$  с и  $t_2 = 0,3$  с.

Условием окончания нагрева (зачистки) является нагрев проводника в точках a и b до значения температуры  $T_k$ , равной температуре разрушения

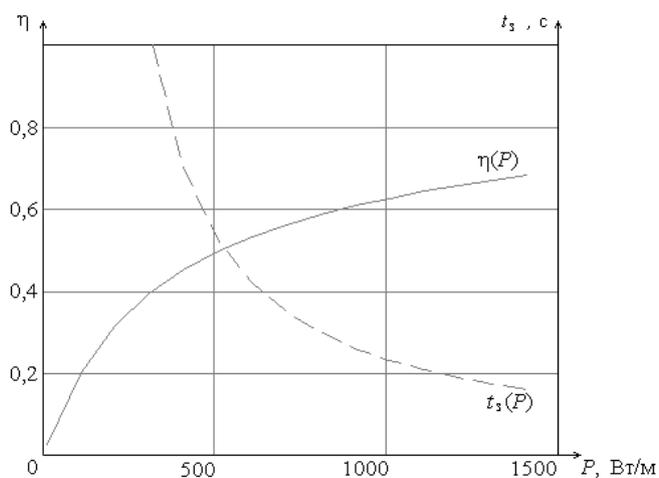


Рис. 3. КПД нагрева участка провода диаметром 0,3 мм, длиной 10 мм и время зачистки

**Калинин Роман Геннадьевич**

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа

Тел.: +7-960-978-57-69

Эл. почта: rokali@mail.ru

**Семенов Валерий Дмитриевич**

Канд. техн. наук, профессор, зам. зав. каф. ПрЭ по научной работе

Тел.: +7-913-821-22-92

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

**Федотов Владимир Александрович**

Зав. лаб. группового проектного обучения каф. ПрЭ

Тел.: +7-952-888-46-13

Эл. почта: fva@vipelec.ru

Kalinin R.G., Semenov V.D., Fedotov V.A.

**The induction heating of a copper wire in the gap for stripping electrical insulation**

In the paper we calculated the efficiency of induction heating of a copper wire site for stripping electrical insulation. The curves of efficiency of stripping copper wire and end time of stripping are given in this article.

**Keywords:** Stripping, induction heating, efficiency.

---