

©Резниченко Н.К., Коваленко И.В., Куприянов А.В., Попов Н.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ТИПОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗНЫХ ЧАСТОТ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

1.Актуальность

Индукционный нагрев для сборки и разборки соединений – это низкотемпературный нагрев (до 400°С), который нашел свое применение сравнительно недавно – с 70-х годов прошлого столетия. Технологии и индукционное оборудование создавались для конкретных изделий на эмпирической основе без учета фактора энергосбережения, что обычно приводило к низким значениям КПД.

Перспективность сборки и разборки соединений с натягом с использованием индукционного нагрева выдвигает задачи не фрагментарного анализа процессов и оборудования, а целостного, единого подхода, позволяющего выявить общие закономерности их функционирования как систем. Единый подход даст возможность установить взаимосвязь конструкций соединения, технологий и оборудования, что может обеспечить получение максимального технического эффекта.

Одним из направлений решения поставленной проблемы, особенно в ответственных дорогостоящих соединениях, является дискретно-последовательное или совместное использование электромагнитных полей разных частот, позволяющих качественно производить сборку и разборку соединений.

Использование повышенных в несколько раз частот, по отношению к промышленной (50 Гц), позволяет концентрировать поток магнитного поля, что особенно важно при разборке соединений.

Таким образом, необходимо решить научно-техническую проблему, состоящую в необходимости повышения качества технологий сборки и разборки сборочных единиц (соединений с натягом) различного назначения в машиностроительном производстве, при одновременном снижении трудоемкости и энергозатрат.

2. Изложение основного материала

Рассмотрим индуктор (рис. 1).

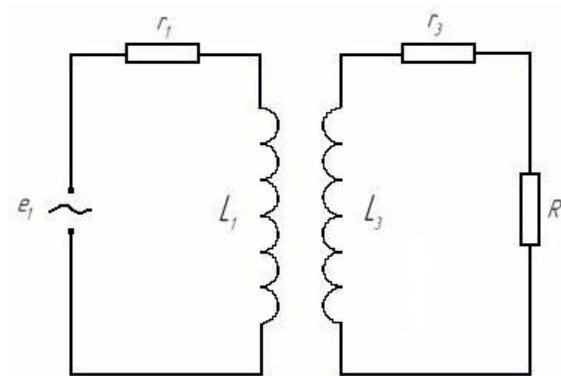


Рис. 1 – Эквивалентная схема замещения индуктора при работе на одной частоте

$$\begin{cases} r_1 \vec{i}_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} = e_1 = E\sqrt{2} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ R + r_3 \vec{i}_3 + \frac{d\Phi_3}{dt} = 0 \end{cases},$$

где

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M i_3, \quad \Phi_3 = M i_1 + L_3 i_3.$$

Предлагая $L_1 = L_3 = M = L$, получим

$$\begin{cases} r_1 \vec{i}_1 + L \left(\frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{d\vec{i}_3}{dt} \right) = e_1 \\ R + r_3 \vec{i}_3 + L \left(\frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{d\vec{i}_3}{dt} \right) = 0 \end{cases}$$

Полагая $\frac{r_1}{R + r_3} = k$, имеем

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} + \frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{L} i_3 = -\frac{1}{k+1} \frac{E\sqrt{2}}{R+r_3} \omega_1 \cos(\omega_1 t + \psi_1) \\ i_1 = \frac{e_1}{k(R+r_3)} + \frac{1}{k} i_3 \end{cases}$$

Пренебрегая затухающей со временем составляющей силы тока, имеем

$$i_3 = -\frac{E\sqrt{2}}{k+1} \frac{1}{R+r_3} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma) \quad \text{где}$$

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}}, \quad \sin \gamma = \frac{\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}}{\sqrt{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}}$$

$$i_1 = -\frac{E\sqrt{2}}{k(R+r_3)} \left\{ \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \frac{1}{k+1} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma) \right\}$$

Активные мощности P_R, P_1, P_3, P_Σ определяем по формулам:

$$P_R = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 R dt = \frac{E^2}{k+1} \frac{R}{R+r_3} \frac{1}{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2};$$

$$P_1 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_1^2 r_1 dt = \frac{E^2}{k(R+r_3)} \left\{ 1 - \frac{2k+1}{k+1} \frac{1}{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2} \right\};$$

$$P_3 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 r_3 dt = \frac{E^2}{k+1} \frac{r_3}{R+r_3} \frac{1}{1+\left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2};$$

$$P_{\Sigma} = P_R + P_1 + P_3 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} e_1 i_1 dt = \frac{E^2}{k(R+r_3)} \left\{ 1 - \frac{1}{k+1} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \right\}.$$

Активная мощность

$$P_R(M\omega_1) = \frac{E^2}{k+1} \frac{R}{k+r_3} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 \frac{1}{M^2}},$$

где $M \geq 1, M \in \mathbb{N}$.

Тогда, рассматривая функцию $f(M) = \frac{P_R(M\omega_1)}{P_R(\omega_1)} = \frac{1}{1+A} \frac{1+A}{M^2}$, где

$A = \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 > 0$, устанавливаем, что ее график имеет вид:

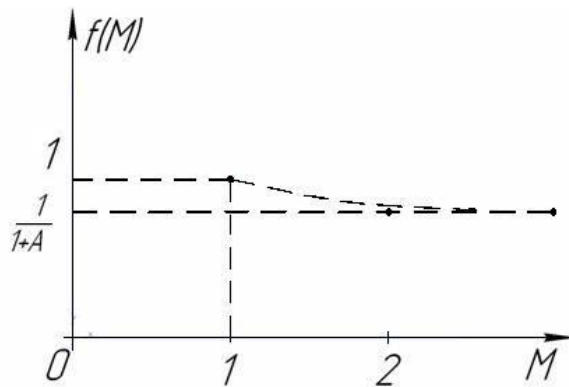


Рис. 2 – График функции $f(M) = \frac{1}{1+A} \frac{1+A}{M^2}$

График функции $\varphi(M) = \frac{1}{f(M)} = A+1 - \frac{A}{M^2+A}$ имеет вид:

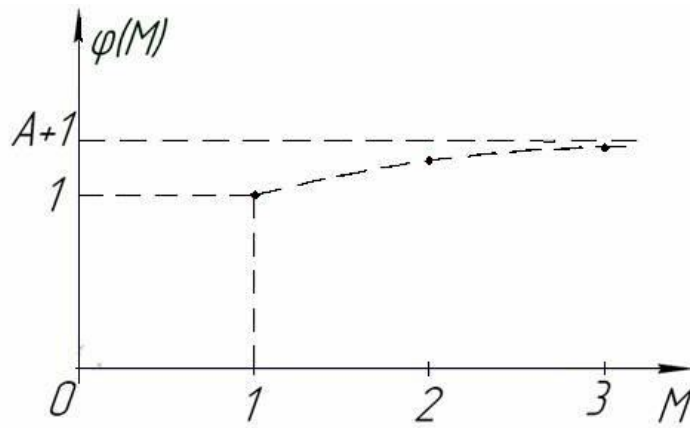


Рис. 3 – График функции $\varphi(M) = A+1 - \frac{A(A+1)}{M^2 + A}$

Найдем полную мощность системы $P_{S\Sigma}$

$$P_{S\Sigma} = I_1 E$$

Так как

$$i_1 = \frac{E\sqrt{2}}{k(R+r_3)} \left\{ \left[1 - \frac{1}{k+1} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \right] \sin(\omega_1 t + \psi_1) - \frac{k}{k+1} \frac{\frac{R+r_3}{\omega_1 L}}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \cos(\omega_1 t + \psi_1) \right\}, \text{ то}$$

$$I_1 = \frac{E}{k(k+1)(R+r_3)} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \sqrt{\left\{ k + k+1 \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 \right\}^2 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2}.$$

Тогда полная мощность системы

$$P_{S\Sigma} = \frac{E^2}{k(k+1)(R+r_3)} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \sqrt{\left\{ k + k+1 \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 \right\}^2 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2}$$

Учитывая, что активная мощность системы

$$P_{\Sigma} = \frac{E^2}{k(k+1)(R+r_3)} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \left\{ k + k+1 \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 \right\},$$

коэффициент мощности системы равен

$$\frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}} = \cos\varphi = \frac{k + \frac{R+r_3}{\omega_1 L}}{\sqrt{\left(k + \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} < 1$$

Электрический КПД равен

$$\eta = \frac{P_R}{P_{\Sigma}}$$

I. Рассмотрим трансформатор (рис. 1) с

$$e_1 = E\sqrt{2} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \quad \text{и} \quad \sin(\omega_2 t + \psi_2).$$

Тогда для силы тока i_3 получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{di_3}{dt} + \frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{L} i_3 = -\frac{1}{k+1} \frac{E\sqrt{2}}{R+r_3} \left[\omega_1 \cos(\omega_1 t + \psi_1) + \omega_2 \cos(\omega_2 t + \psi_2) \right].$$

Пренебрегая затухающей по времени составляющей силы тока, имеем

$$i_3 = \frac{E\sqrt{2}}{k+1} \frac{1}{R+r_3} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma_{\omega_1}) + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\omega_2 t + \psi_2 + \gamma_{\omega_2}) \right\},$$

где

$$\sin \gamma_{\omega} = \frac{\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}, \quad \cos \gamma_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}.$$

Тогда

$$i_1 = \frac{E\sqrt{2}}{k \frac{R+r_3}{\omega_1 L}} \left\{ \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \frac{1}{k+1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma_{\omega_1}) + \sin(\omega_2 t + \psi_2) + \frac{1}{k+1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\omega_2 t + \psi_2 + \gamma_{\omega_2}) \right\}$$

Активные мощности P_1, P_3, P_R при $\omega_2 = M\omega_1, M > 1, M \in N$ определяются формулами:

$$P_1 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_1^2 r_1 dt = \frac{E^2}{k(R+r_3)} \left\{ 2 - \frac{\frac{2k+1}{(k+1)^2}}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} - \frac{\frac{2k+1}{(k+1)^2}}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\};$$

$$P_3 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 r_3 dt = \frac{E^2 r_3}{(k+1)^2 (R+r_3)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\};$$

$$P_R = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 R dt = \frac{E^2 R}{(k+1)^2 (R+r_3)^2} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\}.$$

Тогда активная мощность

$$P_\Sigma = P_1 + P_3 + P_R = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} e_1 i_1 dt = \frac{E^2}{k(R+r_3)} \left\{ 2 - \frac{1}{k+1} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right] \right\}$$

При $\omega_1 = \omega_2$

$$e_1 = 2\sqrt{2}E \sin(\omega_1 t + \psi_1);$$

$$i_3 = \frac{2\sqrt{2}E}{k+1} \frac{1}{R+r_3} \frac{\sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma)}{\sqrt{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2}};$$

$$P_R(\omega_1, \omega_1) = \frac{4E^2}{(k+1)^2} \frac{R}{(R+r_3)^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2}$$

В случае $\omega_2 = M\omega_1, M > 1, M \in N$

$$\frac{P_R(\omega_1, \omega_1)}{P_R(\omega_1, M\omega_1)} = f(M) = \frac{4}{2+A} + \frac{4A(A+1)}{M^2 + \frac{A}{2+A}}, \text{ где } A = \left(\frac{k}{k+1} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 > 0$$

График функции $f(M)$ имеет вид:

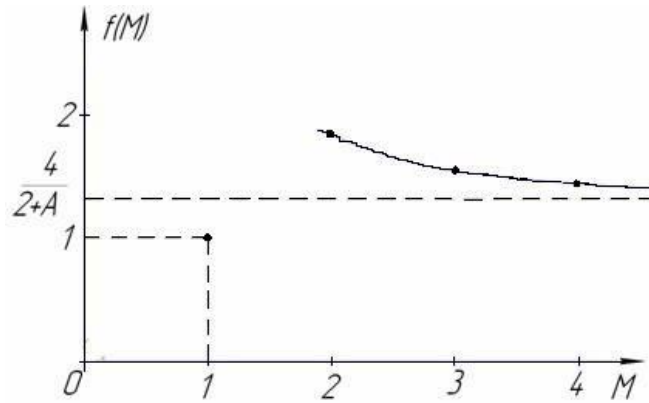


Рис. 4 – График функции $f(M) = \frac{4}{2+A} + \frac{4A(A+1)}{M^2 + \frac{A}{2+A}}$

График функции $\varphi(M) = \frac{1}{f(M)} = \frac{A+2}{4} - \frac{A(A+1)}{M^2 + A}$ имеет вид:

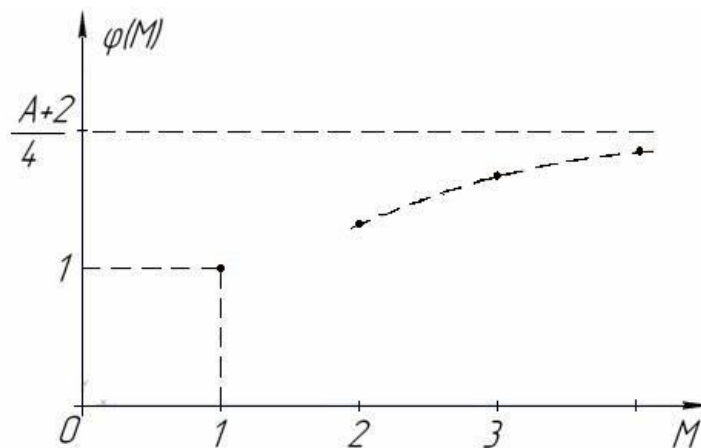


Рис. 5 – График функции $\varphi(M) = \frac{1}{f(M)} = \frac{A+2}{4} - \frac{A(A+1)}{M^2 + A}$ при $A > 2$

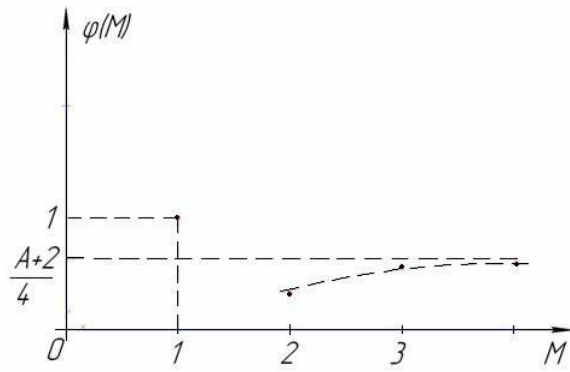


Рис. 6 – График функции $\varphi(M) \equiv \frac{1}{f(M)} = \frac{A+2}{4} - \frac{A(A+1)}{M^2+A}$ при $A < 2$

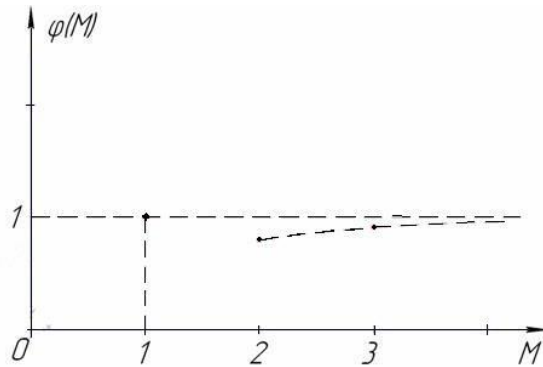


Рис. 7 – График функции $\varphi(M) \equiv \frac{1}{f(M)} = \frac{A+2}{4} - \frac{A(A+1)}{M^2+A}$ при $A = 2$

II. Рассмотрим индуктор, работающий на разных частотах, рис. 8.

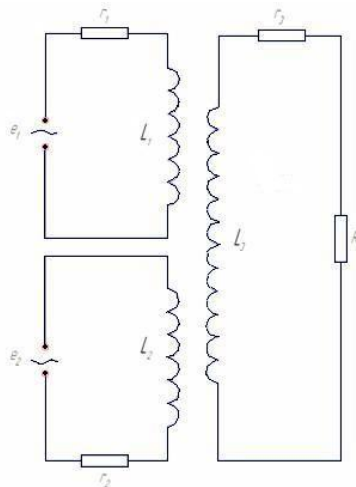


Рис. 8 – Эквивалентная схема замещения индуктора при работе на разных частотах

Для сил токов i_1, i_2, i_3 имеем следующую систему уравнений

$$\begin{cases} r_1 i_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} = e_1 = E\sqrt{2} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ r_2 i_2 + \frac{d\Phi_2}{dt} = e_2 = E\sqrt{2} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \\ R + r_3 i_3 + \frac{d\Phi_3}{dt} = 0 \end{cases}$$

где

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 + M_{13} i_3$$

$$\Phi_2 = M_{12} i_1 + L_2 i_2 + M_{23} i_3$$

$$\Phi_3 = M_{13} i_1 + M_{23} i_2 + L_3 i_3$$

В случае $L_1 = L_2 = L_3 = M_{12} = M_{13} = M_{23} = L$

$$\begin{cases} r_1 i_1 + L \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} = e_1 \\ r_2 i_2 + L \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} = e_2 \\ R + r_3 i_3 + L \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} = 0 \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{cases} i_1 = \frac{e_1}{r_1} + \frac{R+r_3}{r_1} i_3 \\ i_2 = \frac{e_2}{r_2} + \frac{R+r_3}{r_2} i_3 \\ \frac{di_3}{dt} + \frac{KS}{KS+K+S} \frac{r_3+R}{L} i_3 = -\frac{KS}{KS+K+S} \frac{1}{R+r_3} \left(\frac{1}{K} \frac{de_1}{dt} + \frac{1}{S} \frac{de_2}{dt} \right), \end{cases}$$

где $K = \frac{r_1}{R+r_3}$; $S = \frac{r_2}{R+r_3}$

Пренебрегая затухающими по времени составляющими сил токов, имеем

$$i_3 = -\frac{E\sqrt{2}}{R+r_3} \frac{1}{KS+K+S} \left[\frac{S}{\sqrt{1+\left(\frac{KS}{KS+K+S} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\omega_1 t + \psi_1 + \gamma_{\omega_1}) - \frac{K}{\sqrt{1+\left(\frac{KS}{KS+K+S} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\omega_2 t + \psi_2 + \gamma_{\omega_2}) \right],$$

$$\text{где } \sin \gamma \varphi \approx \frac{\frac{KS}{KS+S+K} \frac{R+r_3}{\omega L}}{\sqrt{1+\left(\frac{KS}{KS+S+K} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}, \quad \cos \gamma \varphi \approx \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{KS}{KS+S+K} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}.$$

При $K=S$ и r_2

$$i_3 = -\frac{E\sqrt{2}}{R+r_3} \frac{1}{K+2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\varphi_1 t + \psi_1 + \gamma \varphi_1) + \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\varphi_2 t + \psi_2 + \gamma \varphi_2) \right\},$$

$$\text{где } \sin \gamma \varphi \approx \frac{\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega L}}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}, \quad \cos \gamma \varphi \approx \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega L}\right)^2}}$$

$$i_1 = -\frac{E\sqrt{2}}{K(R+r_3)} \left\{ \sin(\varphi_1 t + \psi_1) + \frac{1}{K+2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\varphi_1 t + \psi_1 + \gamma \varphi_1) + \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\varphi_2 t + \psi_2 + \gamma \varphi_2) \right] \right\}$$

$$i_2 = -\frac{E\sqrt{2}}{K(R+r_3)} \left\{ \sin(\varphi_2 t + \psi_2) + \frac{1}{K+2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2}} \sin(\varphi_1 t + \psi_1 + \gamma \varphi_1) + \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2}} \sin(\varphi_2 t + \psi_2 + \gamma \varphi_2) \right] \right\}$$

Вычисление активных мощностей P_1, P_2, P_3, P_R в случае

$\omega_2 = M\omega_1, M > 1, M \in N$ приводит к следующим формулам:

$$P_1 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_1^2 r_1 dt = \frac{E^2}{K(R+r_3)} \left\{ 1 - \frac{3+2K}{K+2} \frac{1}{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2} + \frac{1}{K+2} \frac{1}{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2} \right\};$$

$$P_2 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_2^2 r_2 dt = \frac{E^2}{K(R+r_3)} \left\{ 1 + \frac{1}{K+2} \frac{1}{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L}\right)^2} - \frac{3+2K}{K+2} \frac{1}{1+\left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L}\right)^2} \right\};$$

$$P_3 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 r_3 dt = \frac{E^2 r_3}{K(R+r_3)} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\};$$

$$P_R = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 R dt = \frac{E^2 R}{K(R+r_3)} \left\{ \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\};$$

$P_\Sigma = P_1 + P_2 + P_3 + P_R = P_\Sigma^{\text{с}} + P_\Sigma^{\text{р}}$, где P_Σ - активная мощность системы;

$$P_\Sigma^{\text{с}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} e_1 i_1 dt = \frac{E^2}{K(R+r_3)} \left\{ 1 - \frac{1}{K+2} \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} \right\};$$

$$P_\Sigma^{\text{р}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} e_2 i_2 dt = \frac{E^2}{K(R+r_3)} \left\{ 1 - \frac{1}{K+2} \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right\}.$$

$$\text{Тогда } P_\Sigma = \frac{E^2}{K(R+r_3)} \left\{ 2 - \frac{1}{K+2} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_2 L} \right)^2} \right] \right\}.$$

В общем случае $\omega_1 = \omega_2$

$$i_3 \langle \omega_1, \omega_1 \rangle = -\frac{2\sqrt{2}E}{R+r_3} \frac{1}{K+2} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2}} \sin \langle \omega_1 t + \psi_1 + \gamma \rangle;$$

$$P_R \langle \omega_1, \omega_1 \rangle = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_3^2 \langle \omega_1, \omega_1 \rangle R dt = \frac{4E^2 R}{(R+r_3)(K+2)} \left[1 + \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 \right].$$

Рассмотрим функцию $f(M) = \frac{P_R(\omega_1)}{P_R(M\omega_1)}$, где $\begin{cases} M > 1 \\ M \in N \end{cases}$

$$f(M) = \frac{4}{2+A} + \frac{4A(A+1)}{M^2 + \frac{A}{2+A}}, \text{ где } A = \left(\frac{K}{K+2} \frac{R+r_3}{\omega_1 L} \right)^2 > 0$$

График функции $f(M)$ имеет вид, показанный на рис. 4.

Для функции $\varphi(M) = \frac{1}{f(M)} = \frac{A+2}{4} - \frac{A(A+1)}{M^2+A}$ график тот же, что и в

случае I.

Выводы

В результате проведенных теоретических исследований, создана обобщенная модель типовой проводимости и взаимодействия магнитных полей разных частот, которая позволяет рассчитать активную и полную мощности нагревателя при действии разных частот.

Создана физико-математическая модель нагрева изделий до заданной глубины и определенных диапазонных размеров, которая позволяет находить параметры и индуктора, что работает в разных режимах.

Применение для нагрева деталей токов различных частот позволяет повысить качество сборки и особенно разборки соединений.

Эффект особенно значителен при нагреве деталей, имеющих относительно малую толщину нагреваемой стенки, за счет более управляемого потока поля повышенной частоты.

Предложенные решения по созданию системы индукционного нагрева изделий разного назначения и номенклатуры кардинально решают проблему экономного нагрева деталей при их термообработке, сборке и разборке соединений, поскольку процесс будет осуществляться на универсальном оборудовании, что существенно снизит трудовые затраты и обеспечит соответствующую экономию по стоимости изделий.

Разработанные способы формирования и управления электромагнитным полем можно использовать в процессах, где необходим качественный нагрев. Полученные зависимости расчета режимов нагрева будут использоваться при проектировании индукционных нагревателей.

Список использованных источников:

1. Дука А. К. Нелинейная модель теплового режима сборки и разборки соединений с натягом / А. К. Дука, Н. К. Резниченко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. – Х., 2005. – № 23. – С. 89–95.

2. Дука А. К. Индукционный нагрев деталей технологических соединений асимметричным электромагнитным полем / А. К. Дука, Н. К. Резниченко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип.: Машинознавство та САПР. – Х., 2006. – № 24. – С. 84–91.

3. Ключко В. А. Нелинейная физико-математическая модель сборки соединений с натягом при использовании нагрева / В. А. Ключко, А. К. Дука, Н. К. Резниченко // Вісник науки і техніки / Нац. техн. ун-т «ХПІ». – Х., 2005. – № 4 (23). – С. 28.

4. Павлов Н. А. Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей / Н. А. Павлов. – М.: Энергия, 1978. – 118 с.

5. Резниченко Н. К. Качество сборки соединений с натягом при использовании нагрева / Н. К. Резниченко, А. К. Дука // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение, 2005. – № 8. – С. 34–38.

Резниченко Н.К., Коваленко И.В., Куприянов А.В., Попов Н.В.

«Определение и построение обобщенной модели типовой проводимости и взаимодействия магнитных полей разных частот при индукционном нагреве».

В статье рассмотрены вопросы индукционного нагрева тонкостенных ответственных деталей токами разных частот.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, электромагнитные поля.

Резніченко М.К., Коваленко І.В., Купріянов О.В., Попов М.В.
«Визначення і побудова узагальненої моделі типової провідності та взаємодії магнітних полів різних частот при індукційному нагріванні».

В статті розглянуто питання індукційного нагріву тонкостінних відповідальних деталей струмами різних частот.

Ключові слова: індукційний нагрів, індуктор, електромагнітні поля.

Reznichenko N., Kovalenko I., Kupriyanov A., Popov N. “Determination and construction of the generalized model of model conductivity and co-operation of the magnetic fields of different frequencies at the induction heating”.

In the article is considered questions of the induction heating of the thin-walled responsible details by the currents of different frequencies.

Key words: induction heating, inductor, electromagnetic fields.

Стаття надійшла до редакції 5 грудня 2011 р.