

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА СЛОЯ ВОЗДУХА МЕЖДУ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ИЗДЕЛИЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЯ ПО ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ЗАКОНУ

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Химическая техника и промышленная экология"
тел. (0572) 707-62-57, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua

Досліджено перехідний процес нагрівання шару повітря між нагрівачем і виробом при зміні температури нагрівача по періодичному закону. Для конкретного випадку знайдені рішення рівняння теплового балансу, які описують перехідний процес нагрівання повітряного шару між обмоткою нагрівача та виробом: загальне стаціонарне рішення Δt_B^ , особисте нестационарне рішення Δt_B^{**} та загальне Δt_B . Побудовано залежності величин Δt_B^* , Δt_B^{**} , Δt_B від часу нагрівання τ .*

Исследован переходный процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому закону. Для конкретного случая найдены решения уравнения теплового баланса, описывающего переходный процесс нагрева слоя воздуха между обмоткой нагревателя и изделием: общее стационарное решение Δt_B^ , частное нестационарное решение Δt_B^{**} и полное решение Δt_B . Построены зависимости величин Δt_B^* , Δt_B^{**} , Δt_B от времени нагрева τ .*

ВВЕДЕНИЕ

В современной литературе достаточно хорошо исследованы статические характеристики трансформаторных и параметрических вихретоковых датчиков (ТВД и ПВД) [1-6] для контроля геометрических, магнитных и электрических параметров немагнитных и ферромагнитных изделий широкого ассортимента.

В работах [6-7] приведен расчет ожидаемых значений сигналов ПВД с нагреваемым изделием и предложен трёхпараметровый метод определения магнитной проницаемости μ_r , радиуса a и температуры t цилиндрического изделия.

Однако, в работах [1-7] не рассматривались динамические характеристики вихретоковых преобразователей, что в свою очередь не позволяло рассматривать переходные процессы электромагнитных преобразователей (бесконтактных и контактных). В последнее время появились работы [10, 11], в которых рассматриваются динамические процессы нагрева слоя воздуха и изделия при скачкообразном изменении температуры нагревателя и воздушного полого цилиндра, находящегося между изделием и нагревателем. В работе [12] получены численные значения постоянных времён намагничивающих обмоток ТВД и ПВД. Следует отметить, что для того, чтобы получить полную картину переходного процесса необходимо исследовать динамические характеристики нагрева слоя воздуха при изменении температуры нагревателя по периодическому закону.

Целью работы является исследование переходного процесса нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому (синусоидальному) закону. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- найти значения общего стационарного решения Δt_B^* (амплитуды приращения температуры слоя воздуха), частного нестационарного решения Δt_B^{**} , а также определить полное решение Δt_B дифференциального уравнения, описывающего процесс нагрева слоя воздуха между изделием и нагревателем при изменении температуры нагревателя по периодическому закону.

- построить зависимости Δt_B^* , Δt_B^{**} , Δt_B от времени нагрева τ .

Сам переходный процесс нагрева слоя воздуха характеризуется тремя решениями дифференциального уравнения теплового баланса, описывающего нагрев воздушного слоя. При этом частное решение характеризует нестационарный (затухающий) режим нагрева слоя воздуха, стационарный режим работы (стационарное решение) характеризует собой постоянный незатухающий синусоидальный режим нагрева. Сумма нестационарного и стационарного решения дает полное решение уравнения теплового баланса, описывающего нагрев слоя воздуха между изделием и нагревателем.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НАГРЕВА СЛОЯ ВОЗДУХА МЕЖДУ НАГРЕВАТЕЛЕМ И ИЗДЕЛИЕМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАТЕЛЯ ПО ПЕРИОДИЧЕСКОМУ ЗАКОНУ

Воспользовавшись результатами работ [10, 11, 12], в которых получены формулы и численные значения тепловой постоянной времени T_B и времени установления процесса нагрева $\tau_{уст}$ воздушного трубчатого цилиндра, а также численное значение

температуры нихромовой проволоки, зная циклическую частоту нагревателя, которая определяет цикл нагревания воздушного цилиндра [11, 12], запишем нестационарное дифференциальное уравнение теплового баланса, характеризующее нагрев слоя воздуха между нагревателем и изделием с учетом [8, 10, 11].

$$T_B \cdot \Delta t'_B + \Delta t_B = \Delta t_{mH} \cdot \sin \omega_H \cdot \tau, \quad (1)$$

где Δt_{mH} - амплитудное значение приращения температуры нагревателя, ω_H - циклическая частота изменения Δt_H , T_B - тепловая постоянная времени слоя воздуха между нагревателем и изделием.

Будем искать решение уравнения (1) в виде двух частей. Стационарная общая часть Δt_B^* решения выражается в виде

$$\Delta t_B^* = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}. \quad (2)$$

Применив символический метод операций с комплексными величинами [9] запишем дифференциальное уравнение (1) в виде

$$T_B \frac{d(\Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau})}{d\tau} + \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}, \quad (3)$$

где Δt_{mB} - амплитудное значение приращения температуры воздушного цилиндра. Отсюда

$$j\omega_H \cdot T_B \cdot \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} + \Delta t_{mB} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau} = \Delta t_{mH} \cdot e^{j\omega_H \cdot \tau}. \quad (4)$$

Разделив обе части (4) на сомножитель $e^{j\omega_H \cdot \tau}$, найдем, что

$$j\omega_H \cdot T_B \cdot \Delta t_{mB} + \Delta t_{mB} = \Delta t_{mH}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что

$$\Delta t_{mB} (1 + j\omega_H \cdot T_B) = \Delta t_{mH}. \quad (6)$$

Амплитудное значение приращения температуры воздушного цилиндра можно определить по формуле

$$\Delta t_{mB} = \frac{\Delta t_{mH}}{1 + j\omega_H \cdot T_B}. \quad (7)$$

Формула (7) дает возможность найти модуль приращения Δt_{mB} в виде

$$|\Delta t_{mB}| = \frac{\Delta t_{mH}}{|1 + j\omega_H \cdot T_B|} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}}. \quad (8)$$

Примем значение частоты нагревателя $f_H = 0,1$ Гц, изменение приращения температуры нагревателя $\Delta t_H = \Delta t_{mH} = 101,2$ °C [11].

Зная циклическую частоту нагревателя, которая определяет цикл нагревания воздушного цилиндра $\omega_H = 0,628$ 1/с [11] и зная найденное ранее значение постоянной времени T_B [12], можно определить модуль приращения Δt_{mB}

$$|\Delta t_{mB}| = \frac{101,2}{\sqrt{1 + (0,628)^2 \cdot (0,6275)^2}} = 94,153 \text{ °C}.$$

Фазовый угол φ_B найдем из выражения

$$\varphi_B = \arctg(-\omega_H \cdot T_B). \quad (9)$$

Знак "-" в (9) свидетельствует о том, что приращение Δt_B отстает по фазе от приращения Δt_H .

$$\varphi_B = \arctg(-0,628 \cdot 0,6275) = -21,507 \text{ град}.$$

В табл. 1 приведены исходные [11] и расчетные данные тепловых параметров воздушного слоя между изделием и нагревателем.

В итоге стационарное решение дифференциального уравнения (1) запишем с учетом (2), (8), (9) в виде

$$\Delta t_B^* = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B). \quad (10)$$

$$\Delta t_B^* = 13,902 \text{ °C}.$$

Для определения частного (нестационарного) решения уравнения (1) на основании соотношений, полученных в [10, 11, 12], запишем

$$\Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot e^{-\tau/T_B} \cdot \sin \varphi_B. \quad (11)$$

$$\Delta t_B^{**} = 94,153 \cdot e^{-0,839/0,6275} \cdot \sin(-21,507) = 9,15 \text{ °C}.$$

В общем случае с учетом [10, 11] полное решение уравнения (1) запишем в виде

$$\Delta t_B = \Delta t_B^* + \Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + A \cdot e^{-\tau/T_B}. \quad (12)$$

Задавшись начальными условиями, т.е. при $\tau = 0$ приращения температуры воздушного цилиндра $\Delta t_B = 0$, получим на основании (9) выражение для определения коэффициента A , который характеризует, на сколько уменьшается амплитуда приращения температуры слоя воздуха Δt_B по сравнению с амплитудой приращения температуры нагревателя Δt_H

$$0 \approx \Delta t_B^* + \Delta t_B^{**} = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(-\varphi_B) + A. \quad (13)$$

Отсюда

$$A = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin \varphi_B. \quad (13)$$

$$A = 94,153 \cdot \sin(21,507) = 34,517 \text{ °C}.$$

Теперь можно найти мгновенные значения Δt_B^* , Δt_B^{**} и Δt_B температуры воздушного цилиндра при синусоидальном во времени изменении приращения Δt_H температуры нагревателя, используя зависимости на рис. 1, т.е. распределения по времени приращения температуры Δt_B^* , Δt_B^{**} и Δt_B слоя воздуха

Зная A общее решение Δt_B , определим по формуле

$$\Delta t_B = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot \sin(\varphi_B) \cdot e^{-\tau/T_B}. \quad (15)$$

Или в итоге получим

$$\Delta t_B = \frac{\Delta t_{mH}}{\sqrt{1 + \omega_H^2 \cdot T_B^2}} \cdot [\sin(\omega_H \cdot \tau - \varphi_B) + e^{-\tau/T_B} \cdot \sin(\varphi_B)] \quad (16)$$

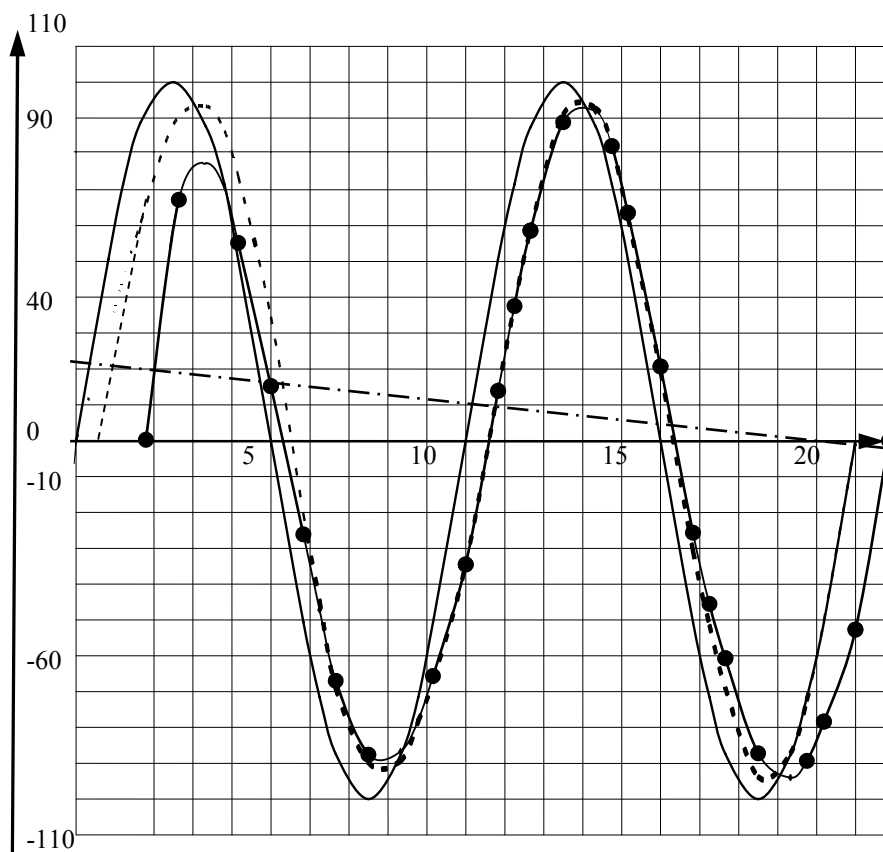


Рис. 1. Зависимости: Δt_H , Δt_B^* , Δt_B^{**} и Δt_B от τ :
 — Δt_H ; - - - Δt_B ; ● — Δt_B^{**} ; - . . . Δt_B^*

Для угла $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$ (табл. 2) при заданной частоте $f_H = 0,1$ Гц имеем

$$\Delta t_B = 94,153 \times \left[\sin(8,49118) + e^{-0,839/0,6275} \cdot \sin(-21,507) \right] = 23,05 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для того, чтобы определить время $\tau_{уст}$ по каждой строке табл. 2, необходимо при заданной частоте f_H разделить соответствующий угол $\omega_H \tau$ в радианах на $2\pi f_H$, например, когда $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$, тогда

$$\tau_{уст} = \frac{1/6\pi}{2\pi \cdot f_H} = \frac{1}{12f_H}. \quad (17)$$

Для данного угла $\tau_{уст}$ составило

$$\tau_{уст} = 0,833 \text{ с}.$$

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, исследован переходный процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому (синусоидальному) закону. Найдены численные значения общего стационарного решения $\Delta t_B^* = 13,902^\circ\text{C}$, частного нестационарного решения $\Delta t_B^{**} = 9,15^\circ\text{C}$ и полного решения дифференциального уравнения, описывающего процесс нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием $\Delta t_B = 23,05^\circ\text{C}$ для конкретного угла $\omega_H \cdot \tau = 1/6\pi$ (табл. 2). Следует отметить, что при больших значениях $\omega_H \tau$ полное

решение переходит в стационарный режим (рис. 1).

На рис. 1 представлены зависимости Δt_H , Δt_B^* , Δt_B^{**} и Δt_B от времени нагрева τ , которые получены с использованием формулы (16).

Как видно из соотношения (16) и рис. 1, пунктирной линией нанесена кривая зависимости приращения Δt_B температуры воздушного цилиндра от времени τ . Эта кривая начинается с нуля времени и равна нулю, так как при $\tau = 0$ и $\Delta t_B = 0$ (см. (16)), сложение двух кривых Δt_B^* и Δt_B^{**} приводит к тому, что в первых полупериодах Δt_B превосходит Δt_B^* (стационарное решение). При дальнейшем увеличении времени τ , благодаря уменьшению по экспоненте нестационарного решения, т.е. Δt_B^{**} , со временем зависимость Δt_B переходит в стационарную синусоиду Δt_B^* (см. на рис. 1 слияние пунктирной кривой со сплошной линией Δt_B^*).

Из формулы (8) и рис. 1 следует также, что в воздушном цилиндре амплитуда приращения Δt_{mv} стационарного изменения температуры уменьшается с $101,2^\circ\text{C}$ до $94,153^\circ\text{C}$ по сравнению с амплитудой приращения Δt_{mH} нагревателя и Δt_B отстает по фазе от Δt_H на угол $\varphi_B = -21,507$ град.

Таблица 1

Значения тепловых параметров воздушного цилиндра между изделием и нагревателем

Δt_{mn} , °C	f , Гц	ω_n , 1/с	T_B , с	Δt_{mv} , °C	Φ_B , град	$tg\Phi_B$	A
101,2	0,1	0,628	0,6275	94,153	-21,507	-0,394	34,517

Таблица 2

Зависимости Δt_n , Δt_B^* , Δt_B^{**} и Δt_B от τ

τ , с	$\omega_n \tau$, рад	Δt_n , °C	Δt_B^* , °C	Δt_B^{**} , °C	Δt_B , °C
0	0	0	0	0	0
0,83	1/6π	50,58	13,90	9,15	23,05
1,25	1/4π	71,55	37,54	4,70	42,25
1,66	1/3π	87,42	58,30	2,44	60,75
2,5	1/2π	101,2	87,60	0,64	88,24
3,33	2/3π	87,74	93,14	0,17	93,31
3,75	3/4π	11,55	86,34	0,08	86,42
4,16	5/6π	50,63	73,70	0,04	73,75
5	1π	0	34,50	0,01	34,51
5,83	1 1/6π	-50,58	-13,90	0,003	-13,89
6,25	1 1/4π	-71,55	-37,54	0,001	-37,54
6,66	1 1/3π	-87,42	-58,90	0,0008	-58,30
7,5	1 1/2π	-101,2	-87,60	0,0002	-87,60
8,33	1 2/3π	-71,55	-93,12	5·10 ⁻⁵	-93,11
8,75	1 3/4π	-50,63	-86,34	3·10 ⁻⁵	-86,34
9,16	1 5/6π	-50,9	-73,70	1·10 ⁻⁵	-73,70
10	2π	0	-34,50	4,1·10 ⁻⁶	-34,50
10,83	2 1/6π	50,58	13,90	1,09·10 ⁻⁶	13,90
11,25	2 1/4π	71,55	37,54	0,5·10 ⁻⁶	37,54
11,66	2 1/3π	87,42	58,58	0,2·10 ⁻⁶	58,58
13,33	2 2/3π	88,68	93,14	2,04·10 ⁻⁸	93,14
13,75	2 3/4π	71,55	86,34	1,05·10 ⁻⁸	86,34
14,16	2 5/6π	50,63	73,70	5,4·10 ⁻⁸	76,70
15	3π	0	34,50	1,4·10 ⁻⁹	34,50
15,83	3 1/6π	-50,58	-13,90	3,8·10 ⁻⁹	-13,90
16,25	3 1/4π	-71,55	-37,54	1,9·10 ⁻¹⁰	-37,54
16,66	3 1/3π	-85,44	-58,58	1,007·10 ⁻¹⁰	-58,58
17,5	3 1/2π	-101,2	-87,60	2,6·10 ⁻¹¹	-87,60
18,33	3 2/3π	-88,68	-93,12	7,07·10 ⁻¹¹	-93,12
18,75	3 3/4π	-71,55	-86,34	3,6·10 ⁻¹²	-86,34
19,16	3 5/6π	-50,96	-73,70	1,8·10 ⁻¹²	-73,70
20	4π	0	-34,50	4,9·10 ⁻¹³	-34,50

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пантелеев М.С., Себко В.П. К теории работы двухпараметрового вихретокового преобразователя для контроля трубчатых проводящих изделий. – Харьков. – Деп. в УкрНИИИТИ, 1985. – 1560. Деп. – 21 с.
- [2] Себко В.П., Хоменко В.Г. К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым проводящим изделием // Вестник ХГПУ, Харьков, ХГПУ, 2000, вып. 92. – С. 76-80.
- [3] Себко В.П., Москаленко И.И., Горкунов Б.М. Определение выходных сигналов параметрического преобразователя. Материалы научно-технической конференции с международным участием "Проблемы автоматизированного электропривода". – Харьков. – 1996, С. 199-200.
- [4] Себко В.П., Горкунов Б.М., Ду Хиан Янг. К расчету ожидаемых значений компонентов сигналов многопараметрового электромагнитного преобразователя // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ"ХПИ", № 9, Т.4. – 2002, С. 115-118.
- [5] Себко В.П., Мохаммад Махмуд Дарвиш. Погрешности определения электромагнитных параметров и потерь мощности в сплошном цилиндрическом изделии. – Техническая электродинамика. Тематический выпуск. – Ч.1. – Киев, 2001.- С. 99-104.
- [6] Себко В.П., Горкунов Б.М., Котуза А.И. Параметрический электромагнитный преобразователь температуры // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6. – Ч.2. – 1998. – С. 301-308.
- [7] Себко В.П., Котуза А.И. Новый трёхпараметровый метод определения электромагнитных параметров и температуры на основе вносимого полного сопротивления датчика. // "Интегрированные технологии и энергосбережение", - НТУ "ХПИ" - 2006 – С. 73-76.
- [8] Теплотехника / Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. Школа, 2000. – 672 с.
- [9] Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – М.: Госэнергиздат, ч. II, 1959. – 444 с.
- [10] Себко В.В. Динамические характеристики теплового преобразователя с нагреваемым цилиндрическим изделием. Материалы международной научно-технической конференции "Силовая электроника и энергоэффективность". – Киев (г. Алушта), 2001.- С. 108-113.
- [11] Себко В.В. Нагрев воздушного кольцевого слоя в проходном электромагнитном преобразователе. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. XIV Международная научно-практическая конференция. – ХТУ "ХПИ". - Харьков. – 2006. - С. 119-124.
- [12] Себко В.В. Определение постоянной времени намагнивающей обмотки электромагнитного преобразователя. – Радиоэлектроника и информатика. – ХНУРЭ. – Вып. 3. – 2006. – С. 12-15.

Поступила 05.09.2006