УДК 621.316.825

В.А.Палагин, канд.техн.наук (БТИ)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАВИСИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТЗЭ)

При конструировании преобразователей температуры на основе ТЗЭ встает вопрос обеспечения линейной зависимости тока в измерительной ветви от измеряемой температуры.

Ток в относительных единицах в любой ветви электрической схемы преобразователя температуры с одним ТЗЭ можно определить в общем виде выражением [1] :

$$\bar{I}_i(T) = \frac{\bar{R}_{тэ}\alpha + \beta}{\bar{R}_{тэ} + \gamma} . \qquad (1)$$

Здесь $\bar{R}_{тэ} = \dfrac{R_{тэ}(T)}{R_j}$; $\bar{I}_i = \dfrac{I_i}{U_ц/R_j}$; $\alpha = \dfrac{a_i R_j}{c}$;

$$\beta = \frac{b_i}{c}; \quad \gamma = \frac{d}{cR_j} ,$$

где R_j – одно из выбранных известным сопротивлением измерительной схемы.

Значения a_i , b_i , c и d определяются для конкретных схем, например, методом эквивалентного генератора. Так, для мостовой схемы рис.1,а значения этих коэффициентов для измерительной цепи (R_o) имеют значения ($R_j = R_3$):

$$\left.\begin{aligned} &\bar{a}_o = a_o/R_3 = \bar{R}_4; \ \bar{b}_o = b_o/R_3^2 = -\bar{R}_2; \\ &\bar{c} = c/R_3^2 = (1+\bar{R}_1)(\bar{R}_o+\bar{R}_2+\bar{R}_4) + \bar{R}_4(\bar{R}_o+\bar{R}_2); \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

$$\left.\begin{aligned}\bar{d} = d/R_3^3 = \bar{R}_1\left[\bar{R}_o(\bar{R}_2+\bar{R}_4)+(\bar{R}_o+\bar{R}_2+\bar{R}_4)\right]+\\ +\bar{R}_2\left[\bar{R}_o(1+\bar{R}_4)+\bar{R}_4\right].\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Разложив функцию $\bar{I}_i(T)$ в ряд Тейлора, получим линеаризованное значение

$$\bar{I}_{i.\,лин}(T) = \bar{I}_i(T_{ср}) + \bar{I}_i(T_{ср})\cdot(T-T_{ср}) + \bar{I}_n, \qquad (3)$$

где $T_{ср}$ – среднее значение температуры линеаризуемого участка зависимости $\bar{I}_i(T)$; $\bar{I}_i'(T_{ср})$ – первая производная тока $\bar{I}_i$ по температуре в точке $T_{ср}$; $\bar{I}_n$ – остаточный член, определяющий ошибку разложения.

С целью уменьшения остаточного члена $\bar{I}_n$, обеспечим равенство нулю второй производной $\bar{I}_i''$. Это одновременно является необходимым условием максимальной температурной чувствительности. Оно определяется на основе уравнения (1) и выражается соотношением

$$\gamma = \frac{\bar{d}}{\bar{c}} = \left[\frac{(\bar{R}'_{тэ})^2}{\bar{R}''_{тэ}} - \bar{R}_{тэ}\right]. \qquad (4)$$

Первая производная $\bar{I}_i'(T)$ равна

$$\bar{I}_i'(T) = \frac{\gamma\alpha-\beta}{(\bar{R}_{тэ}+\gamma)^2}\cdot\bar{R}_{тэ}. \qquad (5)$$

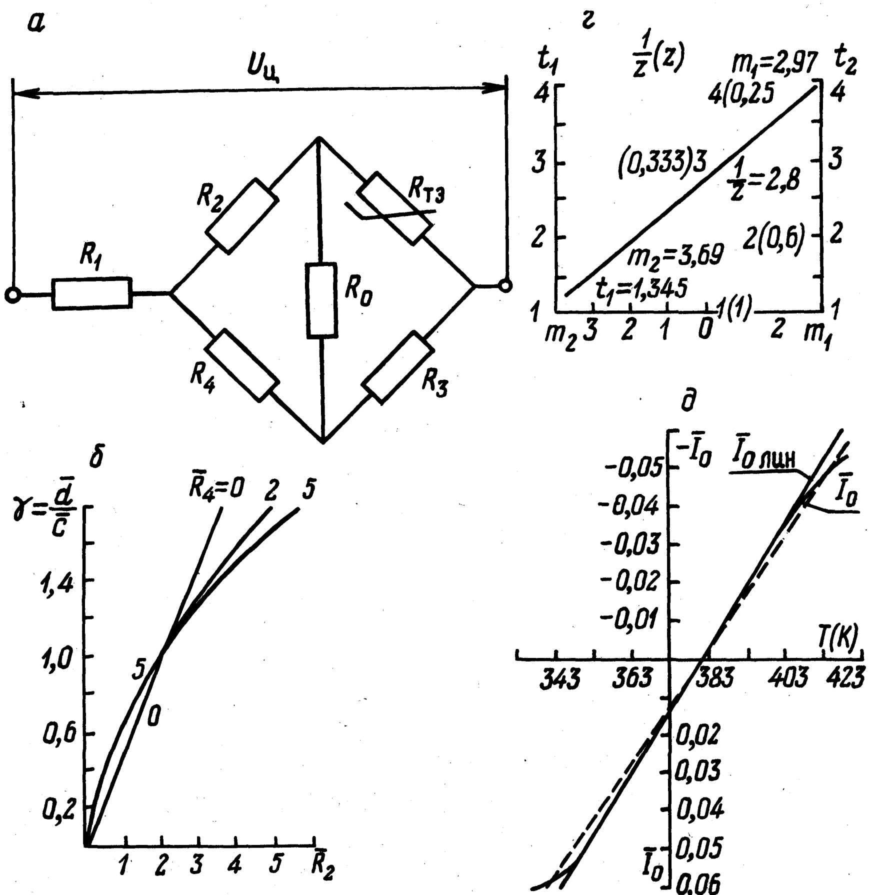
Производные $\bar{R}'_{тэ}$ и $\bar{R}''_{тэ}$ определяются по известным выражениям $\bar{R}_{тэ}(T)$ для конкретных элементов и, например, для термистора равны

$$\bar{R}_{тэ} = \frac{R_\infty}{R_j}\exp\frac{B}{T};\quad \bar{R}'_{тэ} = -\frac{B}{T^2}\bar{R}_{тэ};\quad \bar{R}''_{тэ} =$$

$$= \frac{B}{T^3}\left(\frac{B}{T}+2\right)\bar{R}_{тэ}. \qquad (6)$$

Рассмотрим задачу линеаризации зависимости тока в измерительной диагонали мостовой схемы (рис.1,а) от темпера-

5 Зак.5004



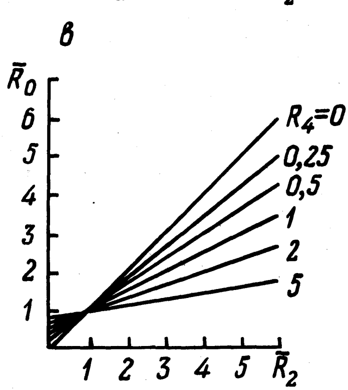


Рис. 1. К расчету параметров мостовой схемы: а — мостовая схема; б — зависимость $\gamma = f_1(\bar{R}_2)$ при $\bar{R}_4$=const; в — зависимость $\bar{R}_0 = f_2(\bar{R}_2)$ при $\bar{R}_4$=const; г – номограмма $\frac{1}{z} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}$; д — зависимости $\bar{I}_0(T)$.

туры. В качестве сопротивления R_j примем сопротивление R_3. Соотношение γ определяется выражением

$$\gamma = \frac{\bar{R}_1[\bar{R}_o(\bar{R}_2+\bar{R}_4)+(\bar{R}_o+\bar{R}_2+\bar{R}_4)]+\bar{R}_2[\bar{R}_o(1+\bar{R}_4)+\bar{R}_4]}{(1+\bar{R}_1)(\bar{R}_o+\bar{R}_2+\bar{R}_4)+\bar{R}_4(\bar{R}_o+\bar{R}_2)},$$

где

$$\bar{R}_1=R_1/R_3;\ \bar{R}_2=R_2/R_3;\bar{R}_4=R_4/R_3;\bar{R}_o=R_o/R_3.$$

Нетрудно показать, что условием наилучшего использования мощности ТЗЭ (т.е. условием максимума $\frac{P_{изм}}{P_{тэ}}$) является равенство

$$\bar{R}_o = \frac{\bar{R}_2/\bar{R}_4+1}{1/\bar{R}_4+1}. \qquad (7)$$

С учетом (7)

$$\gamma = \frac{\bar{R}_1(\bar{R}_2+\bar{R}_4)\left(2+\frac{\bar{R}_2}{1+\bar{R}_4}\right)+\bar{R}_2(\bar{R}_2+2\bar{R}_4)}{(1+\bar{R}_1)(\bar{R}_2+\bar{R}_4)\left(1+\frac{1}{1+\bar{R}_4}\right)+\bar{R}_4\left(\frac{\bar{R}_2+\bar{R}_4}{1+\bar{R}_4}+\bar{R}_2\right)}. \qquad (8)$$

На рис.1,б приведена зависимость $\gamma = f_1(\bar{R}_2)$ при $\bar{R}_1 = 0$ и $\bar{R}_4 = const$, а на рис.1,в функция $\bar{R}_o = f_2(\bar{R}_2)$ при $\bar{R}_4 = const$.

Поскольку в выражение $\bar{I}_i'(T)$ входит соотношение

$$\gamma\alpha-\beta = z, \qquad (9)$$

то для облегчения выбора параметров измерительной схемы целесообразно построить номограмму z в функции параметров мостовой схемы. Для этого, подставив значения γ, α, β (при R_1=0), приведем уравнение (7) к виду

$$\frac{1}{z} = \frac{\gamma\bar{R}_4\cdot 2/\gamma+\bar{R}_2(2+\bar{R}_4)}{\gamma\bar{R}_4+\bar{R}_2}. \qquad (10)$$

Введя обозначения

$$m_1 = \gamma \bar{R}_4; \quad m_2 = \bar{R}_2; \quad t_1 = \frac{2}{\gamma}; \quad t_2 = 2 + \bar{R}_4,$$

перепишем (9) в виде

$$\frac{1}{z} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}. \tag{11}$$

В [2] показано, что зависимость (11) может быть представлена в виде номограммы с двумя бинарными полями в системе выраженных точек (рис.1,г).

Таким образом, пользуясь номограммами рис.1,а,б,в,г, можно достаточно просто выбрать параметры измерительной схемы, обеспечивающие линейную зависимость $\bar{I}_0(T)$.

<u>Пример.</u> Требуется спроектировать мостовую схему с линейной зависимостью тока в измерительной диагонали от температуры. Температурный интервал $\pm 50^{\circ}$ со средним значением температуры $T_{ср} = 373К$. В качестве ТЗЭ принять термистор КМТ-14, $R_{20} = 74$ кОм, B=3855 K, $R_{\infty} = 0{,}143$ Ом. Примем $R_1 = 0$.

Порядок расчета

1. Определим значение γ для температуры $T_{ср}$, пользуясь выражениями (4) и (6):

$$\gamma = \frac{\bar{d}}{\bar{c}} = \left[2\,\frac{B/T_{ср}}{B/T_{ср}+2} - 1\right] \bar{R}_{тэ.ср} = 0{,}676 \bar{R}_{тэ.ср}$$

Выбрав

$$\bar{R}_{тэ.ср} = \frac{R_{тэ}(T_{ср})}{R_3} = 2{,}2 \quad \left(R_3 = \frac{0{,}143 \cdot \exp(3855/373)}{2{,}2} = \right.$$

$$\left. = 2000 \text{ Ом}\right),$$

находим $\gamma = 1{,}487$.

2. Приняв $\bar{R}_4 = 2$ (т.е. $R_4 = \bar{R}_4 \cdot R_3 = 4000$ Ом) по графику рис. 1,а, находим $\bar{R}_2 = 3{,}59$ (т.е. $R_2 = \bar{R}_2 R_3 = 7180$ Ом).

3. По найденным значениям $\bar{R}_2$ и $\bar{R}_4$, пользуясь выражением (7) или рис. 1, в, находим $\bar{R}_o = 1,86$ (т.е. $R_o = \bar{R}_o \times R_3 = 3720$ Ом).

Отметим, что при заданном сопротивлении нагрузки R_o расчет целесообразно начинать с определения соотношений $\bar{R}_2$ и $\bar{R}_4$ по графикам рис. 1,б. Далее находится значение γ, соответствующее выбранным значениям $\bar{R}_2$ и $\bar{R}_4$ (по графикам рис. 1,б) и, наконец, определяется $\bar{R}_3$.

4. Используя номограмму рис.1,г для найденных значений γ, $\bar{R}_2$ и $\bar{R}_4$, определяем $\frac{1}{z}$ ($m_2 = \bar{R}_2 = 3,59$; $t_1 = \frac{2}{\gamma} = 1,345$; $m_1 = \gamma \bar{R}_4 = 2,974$; $t_2 = 2 + \bar{R}_4 = 4$). Оно равно $\frac{1}{z} = 2,8$ или $z = 0,357$.

5. Рассчитываем значение $\bar{I}'_o(T_{ср})$, определяющее угол наклона линеаризованной зависимости $\bar{I}_{i\,лин.}(T) = \bar{I}_{o.лин}(T)$ (в соответствии с выражениями (5), (6), (9)):

$$\bar{I}'_o(T_{ср}) = -z\frac{B}{T^2}\cdot\frac{\bar{R}_{тэ.ср}}{(\bar{R}_{тэ.ср}+\gamma)^2} = -0,357\,\frac{3855}{373^2}\times$$

$$\times\frac{2,2}{(2,2+1,487)^2} = -\,0,0016.$$

6. Определяем $\bar{I}_i(T_{ср}) = \bar{I}_o(T_{ср})$, пользуясь уравнением (1). Предварительно найдем

$$\alpha = \frac{\bar{a}_o}{c} = \frac{2}{(1,86+3,59+2)+2(1,86+3,59)} = 0,109;$$

$$\beta = \frac{\bar{b}_o}{c} = -0,196.$$

Тогда $\bar{I}_o(T_{ср}) = \dfrac{2,2\cdot 0,109-0,196}{2,2+1,487} = 0,012.$

7. Записываем уравнение линеаризованной зависимости (на основе (3)):

$$\bar{I}_{o.лин}(T) = \bar{I}_o(T_{ср}) + \bar{I}'_o(T_{ср})\cdot(T-T_o) = 0,012-0,0016(T-T_{ср}).$$

На рис. 1,д приведены расчетные значения зависимости тока через измерительную диагональ мостовой схемы от температуры $\bar{I}_o(T)$ и соответствующая ей линеаризованная зависимость $\bar{I}_{o\,лин}$.

Погрешность при температуре 423К составит 14%.

Точность линеаризации может быть повышена, если действительную зависимость $\bar{I}_o(T)$ аппроксимировать прямой, пересекающейся с действительной, например, при T = 413 K. Угол наклона в этом случае определится выражением

$$\frac{\bar{I}_o(413)-\bar{I}_o(T_{ср})}{413 - T_{ср}} = -0{,}00147.$$

Линеаризованное уравнение при этом принимает вид

$$\bar{I}_{o.лин}(T) = 0{,}012 - 0{,}00147\,(T-T_{ср}).$$

Погрешность при T=423K составит 4,9%.

При уменьшении диапазона измеряемых температур погрешность существенно уменьшается (при измерении температур в диапазоне $\pm 20^o$ от $T_{ср}$ погрешность линеаризации составляет доли процента).

Литература

1. Волошин И.Ф., Палагин В.А. Переходные процессы в цепях с термисторами. - Минск: Наука и техника, 1967, с. 72. 2. Франк М.Л. Номографический справочник. - М.: ГТГИ, 1933, с.17.

УДК 621.314.632

В.Г.Черномашенцев,канд.техн.наук, В.А.Пацкевич,инженер
(БИИЖТ)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ИНВЕРТОРЕ

Широкому внедрению в промышленность индукционного нагрева токами высокой частоты способствует разработка новых источников питания, наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым технологией к индукционной нагревательной ус-