УДК 621.317

И.П. ЗАХАРОВ, канд. техн. наук, Н.В. ШТЕФАН

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ

Прогресс высокочастотной радиоэлектроники, как и других областей техники, тесно связан с уровнем метрологического обеспечения (МО). Одной из особенностей МО на современном этапе является динамический режим работы средств измерений. Последний обусловлен применением импульсной модуляции ВЧ-сигналов, увеличением производительности измерительных операций, а также повышением точности измерений, которое позволяет обнаружить нестационарность объектов, ранее считавшихся стационарными. Одна из основных задач МО динамических измерений — нормирование и определение динамических характеристик (ДХ) средств измерений. Объектом исследования ДХ в СВЧ-технике служат измерительные преобразователи (ИП) мощности. Наиболее распространены среди них так называемые тепловые преобразователи (калориметрические, термоэлектрические, болометрические). Тепловые ИП апериодические, что необходимо учитывать при нахождении их ДХ.

Среди многих методов определения ДХ предпочтение отдается экспериментальным, как наиболее простым и эффективным. Методика определения экспериментальных ДХ включает два основных этапа:

1. Измерение экспериментальной ДХ: воспроизведение испытательного сигнала в частотной или временной области, аналоговая или дискретная регистрация значений ДХ, предварительная обработка данных, заканчивающаяся получением табличного или графического представления нормированной по амплитуде ДХ.

2. Идентификация эмпирической ДХ, заключающаяся в выборе математической модели и нахождении ее параметров (идентификация в узком смысле слова).

При измерении ДХ ИП предпочтение отдается той ДХ, которая определяется с наибольшей точностью. Таковой для СВЧ-преобразователей считается переходная характеристика (ПХ), поскольку прямое измерение других ДХ связано с трудностями в формировании испытательного сигнала.

Для идентификации эмпирических ДХ разработано большое количество методов. На практике наиболее часто используются методы последовательного логарифмирования и последовательного интегрирования ПХ [1]. Однако они довольно трудоемки и имеют невысокую точность, поскольку относятся к графоаналитическим. Кроме того, спецификой тепловых ИП является наличие так называемого времени чистого запаздывания, обусловленного конечной скоростью протекания физических процессов в чувствительном элементе преобразователя. При реализации графоаналитических методов предполагается, что время запаздывания заранее известно и исключено из объема экспериментальных данных. Поэтому для идентификации ПХ ИП предложено использовать метод моментов [2].

В теории последнего доказано, что динамические свойства средств измерений удовлетворительно отражаются ограниченным числом моментов. Для нормированной ПХ $h_{н}(t)$ начальные моменты

$$\alpha_j = \int_0^{\infty} t^{j-1}\left[1 - h_{н}(t)\right]dt, \qquad (1)$$

где $j = 1, 2, ..., m$.

Параметры функций, аппроксимирующих ПХ, выбираются из условий равенства значений начальных моментов ПХ, найденных по экспериментальным данным, и расчетных для выбранной аппроксимирующей функции.

Передаточные функции ИП с запаздыванием и соответствующие им ПХ моделей апериодических ИП приведены в табл. 1, причем $h_{н}(t) = 0$ при $t < t_0$. Для ИП без запаздывания справедливы те же формулы, только $t_0 = 0$.

Таблица 1

№ п/п	Передаточная функция $H(s)$	Переходная характеристика $h_{н}(t)$
1	$\dfrac{1}{\tau s + 1} e^{-t_0 s}$	$1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$
2	$\dfrac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-t_0 s}$	$1 - \dfrac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} - \dfrac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}$
3	$\dfrac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)} e^{-t_0 s}$	$1 - \dfrac{\tau_1^2}{(\tau_1 - \tau_2)(\tau_1 - \tau_3)} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} - \dfrac{\tau_2^2}{(\tau_2 - \tau_1)(\tau_2 - \tau_3)} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} -$ $- \dfrac{\tau_3^2}{(\tau_3 - \tau_1)(\tau_3 - \tau_2)} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}}$
4	$\dfrac{1}{(\tau s + 1)^2} e^{-t_0 s}$	$1 - \left(1 + \dfrac{t - t_0}{\tau}\right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$
5	$\dfrac{1}{(\tau_1 s + 1)^2 (\tau_2 s + 1)} e^{-t_0 s}$	$1 - \dfrac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2}\left(1 + \dfrac{t - t_0}{\tau_1}\right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} + \dfrac{\tau_1 \tau_2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} -$ $- \dfrac{\tau_2^2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}$

№ п/п	Передаточная функция $H(s)$	Переходная характеристика $h_{н}(t)$
6	$\frac{1}{(\tau s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\left(1+\frac{t-t_0}{\tau}+\frac{(t-t_0)^2}{2\tau^2}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$
7	$\frac{(\tau_3 s+1)}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\frac{\tau_1-\tau_3}{\tau_1-\tau_2}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-\frac{\tau_2-\tau_3}{\tau_2-\tau_1}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}$
8	$\frac{(\tau_2 s+1)}{(\tau_1 s+1)^2}e^{-t_0 s}$	$1-\left(1+\left(1-\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)\frac{t-t_0}{\tau_1}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}$
9	$\frac{(\tau_3 s+1)}{(\tau_1 s+1)^2(\tau_2 s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\frac{\tau_1-\tau_3}{\tau_1-\tau_2}\left(1+\frac{t-t_0}{\tau_1}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}+\frac{\tau_1(\tau_2-\tau_3)}{(\tau_1-\tau_2)^2}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-$ $-\frac{\tau_2(\tau_2-\tau_3)}{(\tau_1-\tau_2)^2}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}$
10	$\frac{(\tau_4 s+1)}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)(\tau_3 s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\frac{\tau_1(\tau_1-\tau_4)}{(\tau_1-\tau_2)(\tau_1-\tau_3)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-\frac{\tau_2(\tau_2-\tau_4)}{(\tau_2-\tau_1)(\tau_2-\tau_3)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}-$ $-\frac{\tau_3(\tau_3-\tau_4)}{(\tau_3-\tau_1)(\tau_3-\tau_2)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}}$
11	$\frac{(\tau_2 s+1)}{(\tau_1 s+1)^3}e^{-t_0 s}$	$1-\left(1+\frac{t-t_0}{\tau_1}+\frac{(t-t_0)^2}{2\tau_1^2}-\frac{\tau_2(t-t_0)^2}{2\tau_1^3}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}$
12	$\frac{(\tau_4 s+1)(\tau_5 s+1)}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)(\tau_3 s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\frac{(\tau_1-\tau_5)(\tau_1-\tau_4)}{(\tau_1-\tau_2)(\tau_1-\tau_3)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-\frac{(\tau_2-\tau_5)(\tau_2-\tau_4)}{(\tau_2-\tau_1)(\tau_2-\tau_3)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}-$ $-\frac{(\tau_3-\tau_4)(\tau_3-\tau_5)}{(\tau_3-\tau_1)(\tau_3-\tau_2)}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}}$
13	$\frac{(\tau_3 s+1)(\tau_4 s+1)}{(\tau_1 s+1)^2(\tau_2 s+1)}e^{-t_0 s}$	$1-\frac{(\tau_1-\tau_3)(\tau_1-\tau_4)}{\tau_1(\tau_1-\tau_2)}\left(1+\frac{t-t_0}{\tau_1}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-$ $-\frac{\tau_3\tau_4(\tau_2-\tau_1)+\tau_1^2(\tau_4-\tau_2)+\tau_1\tau_3(\tau_1-\tau_4)}{\tau_1(\tau_1-\tau_2)^2}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-$ $-\frac{(\tau_1-\tau_4)(\tau_2-\tau_3)}{(\tau_1-\tau_2)^2}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}}$

№ п/п	Передаточная функция $H(s)$	Переходная характеристика $h_н(t)$
14	$\dfrac{(\tau_2 s+1)(\tau_3 s+1)}{(\tau_1 s+1)^3} e^{-t_0 s}$	$1-\left(1+\dfrac{\tau_2\tau_3}{\tau_1^2}+\dfrac{t-t_0}{\tau_1}+\dfrac{(t-t_0)^2}{2\tau_1^2}+\dfrac{\tau_2\tau_3(t-t_0)^2}{2\tau_1^4}\right)e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}-$ $-\dfrac{(\tau_2+\tau_3)(t-t_0)^2}{2\tau_1^3}e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}$

Моменты этих ПХ, найденные по формуле (1), представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

№ п/п	Начальные моменты α_j для ИП без запаздывания
1	$\tau^j (j-1)!$
2	$\dfrac{(j-1)!}{\tau_1-\tau_2}\left[\tau_1^{j+1}-\tau_2^{j+1}\right]$
3	$(j-1)!\left[\dfrac{\tau_1^{j+2}}{(\tau_1-\tau_2)(\tau_1-\tau_3)}+\dfrac{\tau_2^{j+2}}{(\tau_2-\tau_1)(\tau_2-\tau_3)}+\dfrac{\tau_3^{j+2}}{(\tau_3-\tau_1)(\tau_3-\tau_2)}\right]$
4	$(j-1)!\,\tau^j(1+j)$
5	$\dfrac{(j-1)!}{(\tau_1-\tau_2)^2}\tau_1^{j+1}\left[\tau_1-2\tau_2+j(\tau_1-\tau_2)\right]+\dfrac{(j-1)!\,\tau_2^{j+2}}{(\tau_1-\tau_2)^2}$
6	$(j-1)!\,\tau^j\left(1+\dfrac{3}{2}j+\dfrac{1}{2}j^2\right)$
7	$\dfrac{(j-1)!}{\tau_1-\tau_2}\left[(\tau_1-\tau_3)\tau_1^j-(\tau_2-\tau_3)\tau_2^j\right]$
8	$\tau_1^j(j-1)!\left[1+j-j\dfrac{\tau_2}{\tau_1}\right]$
9	$\dfrac{(j-1)!}{(\tau_1-\tau_2)^2}\tau_1^j\left[\tau_1^2(1+j)-\tau_1\tau_2(2+j)-\tau_1\tau_3 j+\tau_2\tau_3(1+j)\right]-\dfrac{\tau_2(\tau_3-\tau_2)}{(\tau_1-\tau_2)^2}(j-1)!\,\tau_2^j$
10	$(j-1)!\left[\dfrac{\tau_1-\tau_4}{(\tau_1-\tau_2)(\tau_1-\tau_3)}\tau_1^{j+1}+\dfrac{\tau_2-\tau_4}{(\tau_2-\tau_1)(\tau_2-\tau_3)}\tau_2^{j+1}+\dfrac{\tau_3-\tau_4}{(\tau_3-\tau_1)(\tau_3-\tau_2)}\tau_3^{j+1}\right]$

Окончание табл. 2

№ п/п	Начальные моменты α_j для ИП без запаздывания
11	$(j-1)!\,\tau_1^{\,j}\left[1++j+\frac{1}{2}j(j+1)-\frac{\tau_2}{2\tau_1}j(j+1)\right]$
12	$(j-1)!\left[\frac{(\tau_1-\tau_4)(\tau_1-\tau_5)}{(\tau_1-\tau_2)(\tau_1-\tau_3)}\tau_1^{\,j}+\frac{(\tau_2-\tau_4)(\tau_2-\tau_5)}{(\tau_2-\tau_1)(\tau_2-\tau_3)}\tau_2^{\,j}+\frac{(\tau_3-\tau_4)(\tau_3-\tau_5)}{(\tau_3-\tau_1)(\tau_3-\tau_2)}\tau_3^{\,j}\right]$
13	$\frac{(j-1)!}{(\tau_1-\tau_2)^2}\tau_1^{\,j-1}\left[\tau_1^3(1+j)-\tau_1^2\tau_2(2+j)-\tau_1^2\tau_4 j+\tau_1\tau_2\tau_4(1+j)-\tau_1^2\tau_3 j+\tau_1\tau_2\tau_3(1+j)\right]+$ $+\frac{(j-1)!}{(\tau_1-\tau_2)^2}\tau_1^{\,j-1}\left[\tau_1\tau_3\tau_4(j-1)-\tau_2\tau_3\tau_4 j\right]+\frac{(\tau_2-\tau_3)(\tau_2-\tau_4)}{(\tau_1-\tau_2)^2}(j-1)!\,\tau_2^{\,j}$
14	$(j-1)!\,\tau_1^{\,j}\left[1+\frac{\tau_2\tau_3}{\tau_1^2}+j+\frac{1}{2}j(j+1)+\frac{\tau_2\tau_3}{2\tau_1^2}j(j+1)-\frac{\tau_2+\tau_3}{2\tau_1}j(j+1)\right]$

Таблица 3

№ п/п	Начальные моменты α_j для ИП с запаздыванием
1	$\frac{t_0^{\,j}}{j}+\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}$
2	$\frac{t_0^{\,j}}{j}+\frac{\tau_1}{\tau_1-\tau_2}\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau_1^{\,j-k}+\frac{\tau_2}{\tau_2-\tau_1}\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-k)!}{k!}t_0^{\,k}\tau_2^{\,j-k}$
4	$\frac{t_0^{\,j}}{j}+\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}+\frac{1}{\tau}\sum_{k=0}^{j}\frac{j!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k+1}-\frac{t_0}{\tau}\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}$
6	$\frac{t_0^{\,j}}{j}+\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}+\frac{1}{\tau}\sum_{k=0}^{j}\frac{j!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k+1}-$ $-\frac{t_0}{\tau}\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}+\frac{1}{2\tau^2}\sum_{k=0}^{j+1}\frac{(j+1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k+2}-$ $-\frac{t_0}{\tau^2}\sum_{k=0}^{j}\frac{j!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k+1}+\frac{t_0}{2\tau^2}\sum_{k=0}^{j-1}\frac{(j-1)!}{k!}t_0^{\,k}\tau^{\,j-k}$

Задача идентификации ПХ ИП заключается в определении постоянных τ_i и t_0 через начальные моменты α_j. Для этого составляется система уравнений

$$\begin{cases} \alpha_1 = f_1(\tau_1,\dots,\tau_m,t_0); \\ \alpha_2 = f_2(\tau_1,\dots,\tau_m,t_0); \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \alpha_{n+1} = f_{n+1}(\tau_1,\dots,\tau_m,t_0), \end{cases} \tag{2}$$

в которой число n начальных моментов α_j на единицу больше, чем число m постоянных времени τ_i для ИП с запаздыванием, и равно числу постоянных времени для ИП без запаздывания.

Выражения для τ_i и t_0 даны в табл. 4 и 5.

Таблица 4

№ п/п	Постоянные времени τ_i ПХ ИП без запаздывания
1	$\tau = \alpha_1$
2	$\tau_{1;2} = \dfrac{\alpha_1 \pm \sqrt{4\alpha_2 - 3\alpha_1^2}}{2}$
3	$\tau_i = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\dfrac{\varphi}{3} + \dfrac{(i-1)2\pi}{3}\right) + \dfrac{\alpha_1}{3}$, $i = 1, 2, 3$. Здесь $\rho = \sqrt{\dfrac{1}{27}\left(\dfrac{8}{27}\alpha_1^6 - \dfrac{4}{3}\alpha_1^4\alpha_2 + 2\alpha_1^2\alpha_2^2 - \alpha_2^3\right)}$; $\varphi = \arccos\left(-\dfrac{q}{2\rho}\right)$, где $q = -\dfrac{20}{27}\alpha_1^3 + \dfrac{5}{3}\alpha_1\alpha_2 - \dfrac{\alpha_3}{2}$
4	$\tau = \dfrac{\alpha_1}{2}$
5	$\tau_{1;2} = \dfrac{\alpha_1 \pm \sqrt{3\alpha_2 - 2\alpha_1^2}}{3}$
6	$\tau = \dfrac{\alpha_1}{3}$
7	$\tau_{1;2} = \dfrac{\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_3^2 - 12\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - 12\alpha_1^2\alpha_2^2 + 16\alpha_2^3 + 8\alpha_1^3\alpha_3}}{4(\alpha_2 - \alpha_1^2)}$; $\tau_3 = \dfrac{\alpha_3 - 4\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3}{2(\alpha_2 - \alpha_1^2)}$
8	$\tau_1 = \alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - \alpha_2}$; $\tau_2 = \alpha_1 \pm 2\sqrt{\alpha_1^2 - \alpha_2}$

№ п/п	Постоянные времени τ_i ПХ ИП без запаздывания
10	$\tau_i = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{(i-1)2\pi}{3}\right) - \frac{a}{3}$, $\tau_4 = \frac{\alpha_4 - 6\alpha_2^2 - 24\alpha_1^4 - 15\alpha_1\alpha_3 + 30\alpha_1^2\alpha_2}{12\left(\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3\right)}$. Здесь $i = 1, 2, 3$; $\rho = \sqrt{-\frac{p^3}{27}}$; $\varphi = \arccos\left(-\frac{q}{2\rho}\right)$; $p = \frac{3b - a^2}{3}$; $q = \frac{2a^3}{27} + \frac{ab}{3} - c$; $a = \frac{\alpha_4 - 6\alpha_2^2 - 3\alpha_1\alpha_3 + 6\alpha_1^2\alpha_2}{12\left(\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3\right)}$; $b = \frac{\alpha_1\alpha_4 + 18\alpha_1\alpha_2^2 - 18\alpha_1^3\alpha_2 - 3\alpha_1^2\alpha_3 - 12\alpha_2\alpha_3}{12\left(\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3\right)}$; $c = \frac{6\alpha_1^3 + 3\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 9\alpha_1^3\alpha_2 - \alpha_2\alpha_4 + 6\alpha_2^3 + 12\alpha_1^2\alpha_2^2 - 18\alpha_1^4 + \alpha_1^2\alpha_4}{12\left(\alpha_3 - 2\alpha_1\alpha_2 + 2\alpha_1^3\right)}$
11	$\tau_1 = \frac{3\alpha_1 \pm \sqrt{9\alpha_1^2 - 12\alpha_2}}{2}$; $\tau_2 = \frac{7\alpha_1 \pm 3\sqrt{9\alpha_1^2 - 12\alpha_2}}{2}$
12	$\tau_i = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{(i-1)2\pi}{3}\right) - \frac{a}{3}$; $\tau_{4;5} = \frac{a - \alpha_1 \pm \sqrt{(a - \alpha_1)^2 - 4(\alpha_2 - a\alpha_1 + b)}}{2}$. Здесь $i = 1, 2, 3$; $\rho = \sqrt{-\frac{p^3}{27}}$; $\varphi = \arccos\left(-\frac{q}{2\rho}\right)$; $p = \frac{3b - a^2}{3}$; $q = \frac{2a^3}{27} + \frac{ab}{3} - c$; $a = \frac{\alpha_1\alpha_4 - 3\alpha_2\alpha_3 - c\left(6\alpha_1^2 - 6\alpha_2\right)}{3\alpha_1\alpha_3 - 6\alpha_2^2}$; $b = \frac{c\left(12\alpha_1\alpha_2 - 6\alpha_3\right) - \left(2\alpha_2\alpha_4 - 3\alpha_3^2\right)}{12\alpha_2^2 - 6\alpha_1\alpha_3}$; $c = \frac{\alpha_5\left(6\alpha_1\alpha_3 - 12\alpha_2^2\right) - 8\alpha_1\alpha_4^2 + 48\alpha_2\alpha_3\alpha_4 - 3\alpha_3^3}{288\alpha_2^3 - 288\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + 73\alpha_3^3 + 48\alpha_1^2\alpha_4 - 48\alpha_2\alpha_4}$

№ п/п	Постоянные времени τ_i ПХ ИП без запаздывания
14	$\tau_1 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}+\frac{2\pi}{3}\right) - \alpha_1$; $\tau_2 = 4\alpha_1\tau_1 - 2\alpha_2 + A \mp \sqrt{A^2 - B}$; $\tau_3 = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - B}}{2}$. Здесь $\rho = \sqrt{-\frac{p^3}{27}}$; $\varphi = \arccos\left(-\frac{q}{2\rho}\right)$; $p = -5\alpha_2 - 3\alpha_1^2$; $q = \frac{2}{3}\alpha_1^3 + 5\alpha_1\alpha_2 - \alpha_3$; $A = -\left(3\alpha_1 - \frac{\alpha_2}{\tau_1}\right)$; $B = 3\alpha_1\tau_1 - \alpha_3 + 3\tau_1^2$

Таблица 5

№ п/п	Постоянные времени τ_i, время чистого запаздывания t_0
1	$\tau = \mp\sqrt{2\alpha_2 - \alpha_1^2}$; $t_0 = \alpha_1 \pm \sqrt{2\alpha_2 - \alpha_1^2}$
2	$t_0 = \alpha_1 \pm 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}+\frac{2\pi}{3}\right)$; $\tau_{1;2} = \frac{1}{2}\left[2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}+\frac{2\pi}{3}\right)\right] \pm \sqrt{4\alpha_2 - 2\alpha_1^2 - \left(2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}+\frac{2\pi}{3}\right)\right)^2}$. Здесь $\rho = \sqrt{-\frac{p^3}{27}}$; $\varphi = \arccos\left(-\frac{q}{2\rho}\right)$; $p = 6\alpha_2 - 3\alpha_1^2$; $q = 2\alpha_1^3 - 6\alpha_1\alpha_2 + 3\alpha_3$
4	$\tau = \pm\sqrt{\frac{\alpha_1^2}{2} - \alpha_2}$; $t_0 = \alpha_1 \mp 2\sqrt{\frac{\alpha_1^2}{2} - \alpha_2}$
6	$\tau = \pm\sqrt{\frac{2\alpha_2 - \alpha_1^2}{3}}$; $t_0 = \alpha_1 \mp 3\sqrt{\frac{2\alpha_2 - \alpha_1^2}{3}}$

Методика идентификации ПХ ИП мощности СВЧ включает в себя следующие этапы:

1. По измеренной экспериментальной ПХ вычисляются оценки α_j первых m центральных моментов. При этом, в зависимости от формы представления ПХ, используется графическое или численное интегрирование. Последнее наиболее точно и может быть осуществлено, например, методом Симпсона:

$$\alpha_j = \Delta t \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i + h_{i+1}}{2} (i\Delta t)^{j-1},$$

где n — число интервалов дискретизации.

2. Производится подбор математической модели и определение ее параметров по формулам из табл. 2 — 5. Модель подбирают путем постепенного увеличения числа постоянных времени и введения чистого запаздывания. О том, что достигнут предел ее усложнения, свидетельствует получение результатов, лишенных физического смысла (отрицательных и комплексных значений τ_i, t_0).

3. Вычисляются погрешности идентификации ПХ по формуле

$$\Delta_{h(i\Delta t)} = h_э(i\Delta t) - h_р(i\Delta t),$$

где $h_э(i\Delta t)$ — экспериментальные значения ПХ; $h_р(i\Delta t)$ — значения ПХ, рассчитанные при подстановке в выражение для $h_н(t)$ параметров, полученных в результате идентификации.

4. По полученным характеристикам погрешности выбирается наилучшая модель ПХ.

Таким образом, методика, разработанная на основе метода моментов, дает возможность производить идентификацию апериодических ИП с учетом чистого запаздывания. Методика апробирована при идентификации калориметрического ИП мощности КВЧ, она позволила осуществить эффективную коррекцию его ДХ с целью уменьшить время измерения.

Список литературы: 1. *Грановский В.А.* Динамические измерения: основы метрологического обеспечения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 224 с. 2. *Вайсбанд М.Л., Проненко В.И.* Техника выполнения метрологических работ. К.: Тэхника, 1986. 168 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 13.05.97