АЛГОРИТЪМ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ТОЧНОСТТА НА ИНТЕГРИРАЩИТЕ ЦИФРОВИ ВОЛТМЕТРИ

доц.ктн Стойчо Томов Пседерски

гл.ас.ктн Михаил Петков Илиев

гл.ас.инж.Илия Пенчев Илиев

н.с.инж.Георги Иванов Карабенчев

ВТУ"Ангел Кънчев" - Русе

Хармоничните шумове оказват влияние върху точността на измерване на интегриращите цифрови волтметри. При липса на нелинейни изкривявания или насищане на входния усилвател изходното напрежение на идеален интегратор в първия такт, когато на входа е подадено измерваното напрежение Ux, ще се определи от известния израз

$$U_{изх.1} = K\int_0^{T_и} U_{вх}(t)\,dt = K\int_0^{T_и} (U_x + U_ш)\,dt \;, \qquad (1)$$

където

K - коефициент на предаване на интегратора;

$U_{вх}(t)$ - напрежение подадено на входа на интегратора;

$U_ш = U_m \sin(\omega_ш t + \varphi_ш)$ - шумово напрежение с честота $\omega_ш$ и начална фаза $\varphi_ш$;

$T_и$ - време за първото интегриране

Изходното напрежение на интегратора във втория такт, когато на входа на интегратора е подадено еталонно напрежение Uo с противоположна на Ux полярност се определя от известния израз

$$U_{изх.2} = -K\int_0^{T_x} U_o\,dt \;. \qquad (2)$$

Временният интервал Tx, пропорционален на измерваното постоянно напрежение Ux, се опеделя от условието $U_{изх.1} + U_{изх.2} = 0$. След преобразувания се получава

$$U_x = U_o\,\frac{T_x}{T_и} + U_m \sin\left(\frac{\pi T_и}{T_ш} + \varphi_ш\right)\frac{\sin \pi \frac{T_и}{T_ш}}{\pi \frac{T_и}{T_ш}} \;. \qquad (3)$$

Влиянието на шумовете се свежда до получаването на грешка $\Delta U_ш$, определена от израза

$$\Delta U_ш = U_m \sin\left(\pi\,\frac{T_и}{T_ш} + \varphi_ш\right)\frac{\sin \pi \frac{T_и}{T_ш}}{\pi \frac{T_и}{T_ш}} \;. \qquad (4)$$

Ако времето за интегриране Ти не е кратно на периода на шумовете Тш, т.е. $T_и = T_ш(1+\delta_{T_ш}).n$, то абсолютната грешка $\Delta U_ш$ ще се определи от израза

$$\Delta U_ш = U_m \frac{\sin(n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш)\sin n\pi\delta_{T_ш}}{n\pi(1+\delta_{T_ш})}, \qquad (5)$$

където

n - брой периоди на шумовото напрежение за времето на първото интегриране;

$\delta_{T_ш} = \frac{T_и - T_ш}{T_ш}$ - относителна нестабилност на периода на шума.

Големината на началната фаза $\varphi_ш$, съответстваща на максималната грешка на измерването се определя от условието $\frac{\partial\Delta U_ш}{\partial\varphi_ш} = 0$, т.е.

$$\frac{\partial\Delta U_ш}{\partial\varphi_ш} = U_m \frac{\cos(n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш)\cos n\pi\delta_{T_ш}.n\pi\delta_{T_ш}}{n\pi(1+\delta_{T_ш})}. \qquad (6)$$

Тогава

$$U_m \frac{\cos(n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш)\cos n\pi\delta_{T_ш}.n\pi\delta_{T_ш}}{n\pi(1+\delta_{T_ш})} = 0, \qquad (7)$$

т.е. $\cos(n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш)=0$, откъдето $\varphi_ш = (2k-1)\frac{\pi}{2} - n\pi\delta_{T_ш}$; $(k=1,2,3,\dots)$

Тогава

$$\Delta U_ш = \pm U_m \frac{\sin n\pi\delta_{T_ш}}{n\pi(1+\delta_{T_ш})}. \qquad (8)$$

При $n\pi\delta_{T_ш} < 0{,}1\pi$ се получава $\Delta U_ш \approx \pm U_m \frac{\delta_{T_ш}}{1+\delta_{T_ш}}$

За коефициента на потискане на шумовете NMR се получава

$$NMR = 20\lg\frac{U_m}{|\Delta U_ш|} = 20\lg\frac{n\pi(1+\delta_{T_ш})}{\sin n\pi\delta_{T_ш}}, \qquad (9)$$

а при $n\pi\delta_{T_ш} < 0{,}1\pi$

$$NMR \approx 20\lg\left(1+\frac{1}{\delta_{T_ш}}\right) \approx -20\lg\delta_{T_ш}. \qquad (10)$$

Ако се начертаят графиките на коефициента NMR при стойности на n = 100, 10 и 1 съгласно израз (9) се вижда, че шумозащитеността на интегриращите цифрови волтметри, се повишава при увеличаване броя на периодите n на шумовото напрежение за времето на интегрирането и с намаляване на нестабилността на периода на шума.

При наличието на хармонични шумове относителната грешка при измерване на постоянно напрежение ще бъде

$$\gamma_ш = \frac{\Delta U_ш}{U_x} = \pm \frac{U_m \sin n\pi \delta_{T_ш}}{U_x n\pi (1+\delta_{T_ш})} \quad . \qquad (11)$$

Като интегратори често се използват апериодични звена с импулсна предавателна характеристика $h(t) = \alpha\, e^{-\beta t}$, където

$$\alpha = -K \frac{1}{RC(1+K)} = -\frac{K}{\tau} \; ;$$

$$\beta = \frac{1}{RC(1+K)} = \frac{1}{\tau} \; ;$$

K – коефициент на усилване на усилвателя;

$\tau = RC(1+K)$ – времеконстанта на интегриращата верига.

В такъв случай изходното напрежение на интегратора в края на първия такт ще бъде

$$U_{изх.1} = \int_0^{T_и} h(T_и - t)\, U_{вх}(t)\,dt = -\frac{K}{\tau_1}\, e^{-\frac{T_и}{\tau_1}} \int_0^{T_и} [U_x + U_ш(t)]\, e^{\frac{t}{\tau_1}} dt\,, \quad (12)$$

където

$\tau_1 = R_1 C(1+K)$ – времеконстанта на интегратора в първия такт

От горния израз се получава

$$U_{изх_1} = -KU_x\left(1 - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}\right) - \frac{KU_ш}{1+\omega_ш^2\tau_1^2}\left\{\left[\sin(\omega_ш T_и + \varphi_ш) - \omega_ш\tau_1 \cos(\omega_ш T_и + \varphi_ш)\right] - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}\left(\sin\varphi_ш - \omega_ш\tau_1\cos\varphi_ш\right)\right\}. \quad (13)$$

Изходното напрежение на интегратора в края на втория такт Uизх ще се определи от израза

$$U_{изх.2} = \left(U_{изх.1} - \frac{K}{\tau_2}\int_0^{T_x} U_0\, e^{\frac{t}{\tau_2}} dt\right) . e^{-\frac{T_x}{\tau_2}} \quad , \qquad (14)$$

където

$\tau_2 = R_2 C(1+K)$ – времеконстанта на интегратора в края на втория такт. След преобразувания се получава

$$U_x = U_0 \frac{e^{\frac{T_x}{\tau_2}} - 1}{1 - e^{\frac{T_и}{\tau_2}}} - \frac{U_{изх_2}}{K} \cdot \frac{e^{\frac{T_x}{\tau_2}}}{1 - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}} - \frac{U_ш}{(1+\omega_ш^2\tau_1^2)(1-e^{-\frac{T_и}{\tau_1}})} \cdot \left[\sin(\omega_ш T_и + \varphi_ш) - \omega_ш\tau_1\cos(\omega_ш T_и + \varphi_ш) - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}(\sin\varphi_ш - \omega_ш\tau_1\cos\varphi_ш)\right]$$

Абсолютната грешка дължаща се на шумовото напрежение, ще бъде

$$\Delta U_ш = \frac{U_ш}{(1+\omega_ш^2\tau_1^2)(1-e^{-\frac{T_и}{\tau_1}})}\left[\sin(\omega_ш T_и + \varphi_ш) - \omega_ш\tau_1\cos(\omega_ш T_и + \varphi_ш) - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}(\sin\varphi_ш - \omega_ш\tau_1\cos\varphi_ш)\right] \qquad (16)$$

В общия случай периодът на шумовете не е кратен на времето за интегриране, т.е. $\omega_ш T_и = 2n\pi + 2n\delta_{T_ш}$. Тогава

$$\Delta U_ш = \frac{U_ш}{(1+\omega_ш^2\tau_1^2)(1-e^{-\frac{T_и}{\tau_1}})}\Big[\sin(2n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш) - \omega_ш\tau_1\cos(2n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш) - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}(\sin\varphi_ш - \omega_ш\tau_1\cos\varphi_ш)\Big]. \qquad (17)$$

Ако периодът на шумовете е кратен на времето за интегриране, т.е. $\omega_ш T_и = 2n\pi$, се получава

$$\Delta U_ш = \frac{U_ш}{(1+\omega_ш^2\tau_1^2)}(\sin\varphi_ш - \omega_ш\tau_1\cos\varphi_ш). \qquad (18)$$

За да бъде $\Delta U_ш = 0$ е необходимо $\varphi_ш = arc\,tg\,\omega_ш\tau_1$. При $\omega_ш\tau_1 \gg 1$ и $\varphi_ш = 0$ грешката има максимална стойност $\Delta U_ш = \frac{U_ш}{\omega_ш\tau_1}$.

Ако $\tau_1 \gg T_и$, то $\Delta U_ш \approx \frac{U_ш}{\omega_ш T_и}\left[\cos\varphi_ш - \cos(2n\pi\delta_{T_ш}+\varphi_ш)\right]$

Когато периодът на шумовете не е кратен на рвемето за интегриране, абсолютната грешка ще бъде равна на нула, ако

$$\varphi_ш = arctg\frac{\omega_ш\tau_1\sin 2n\pi\delta_{T_ш} + \cos 2n\pi\delta_{T_ш} - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}}{\sin 2n\pi\delta_{T_ш} - \omega_ш\tau_1\cos 2n\pi\delta_{T_ш} + \omega_ш\tau_1 e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}}. \qquad (19)$$

Големината на фазата $\varphi_ш$, при която се получава максимална абсолютна грешка, се получава от условието $\frac{\partial\Delta U_ш}{\partial\varphi_ш} = 0$

След преобразувания за $\varphi_ш$ се получава

$$\varphi_ш = arctg\frac{\sin 2n\pi\delta_{T_ш} - \omega_ш\tau_1\cos 2n\pi\delta_{T_ш} + \omega_ш\tau_1 e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}}{\omega_ш\tau_1\sin 2n\pi\delta_{T_ш} + \cos 2n\pi\delta_{T_ш} - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}}. \qquad (20)$$

Максималната абсолютна грешка може да бъде определена от израза

$$\Delta U_{ш\,max} = \frac{\sqrt{1 - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}\left(e^{-\frac{T_и}{\tau_1}} + 2\cos 2n\pi\delta_{T_ш}\right)}}{\sqrt{1+\omega_ш^2\tau_1^2}\left(1 - e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}\right)}\cdot U_ш. \qquad (21)$$

При голяма времеконстанта на интегриращата верига $(\tau_1 \gg T_1)$, разлагайки функциите $e^{-\frac{T_и}{\tau_1}}$ и $\cos 2n\pi\delta_{T_ш}$ в степенен ред като се ограничим до първите два члена на тези редове ще получим

$$\Delta U_{ш\,max} \approx \frac{U_ш}{\omega_ш T_и}\cdot 2n\pi\delta_{T_ш}. \qquad (22)$$

За отслабване влиянието на хармоничните шумове, наложени върху измерваното напрежение Ux, може да се използва осредняване на резултатите от две и повече измервания. При еднократно интегриране при наличието на хармоничен шум $U_ш = U_{m_ш}\sin\omega_ш t$ (приемаме $\varphi_ш = 0$) абсолютната грешка на измерването, дължаща се на шума ще бъде

$$\Delta ш_1 = \pm U_{mш} \frac{\sin^2 x}{x}\,, \tag{23}$$

където

$$x = \pi \frac{T_и}{T_ш} = \pi T_и f_ш\,.$$

Коефициентът на потискане на шума в случая е

$$NMR_1 = 20 \lg \frac{U_{mш}}{\Delta ш_1} = 20 \lg \frac{x}{\sin^2 x}\,. \tag{24}$$

Ако честотата на шумовете се изменя в процеса на измерването, за да се получи съществено потискане на шума е необходимо да се увеличи значително времето за интегриране. При изменение на честотата на шума в тесни граници $(\omega_{шmin} \le \omega_ш \le \omega_{шmax})$ значително намаляване на потискането на шума може да се получи с двойното интегриране на шума за два равни помеждутъка от време Ти, разделени с интервал Δ Ти. В този случай абсолютната грешка $\Delta ш_2$ може да се определи от израза

$$\Delta ш_2 = \frac{U_{mш}}{2T_и}\left(\int_0^{T_и} \sin \omega_ш t\,dt + \int_{T_и+\Delta T_и}^{2T_и+\Delta T_и} \sin \omega_ш t\,dt \right) \tag{25}$$

След преобразувания се получава

$$\Delta ш_2 = \frac{U_{mш}}{x} \sin x \sin(2x + \Delta x) \cos(x + \Delta x)\,, \tag{26}$$

където

$$\Delta x = \pi \Delta T_и\, f_ш\,.$$

Грешката, внесена от шума, ще бъде равна на нула за честотите fш = fmin и fш = fmax, ако се изпълнят условията

$$1)\ \sin x_1 = 0\,; \qquad 2)\ \sin(2x_2 + \Delta x_2) = 0\,.$$

От първото условие, полагайки fш = fmin, ще получим, че $x_1 = \pi$ при $T_и = \frac{1}{f_{шmin}}$

От второто условие, полагайки fш = fmax ще получим, че $\Delta T_и = \frac{n_2}{f_{шmax}} - \frac{2}{f_{шmin}}$ което има смисъл само при $n_2 \ge 3$. Избирайки n2 = 3 ще получим

$$\Delta T_и = \frac{3f_{шmin} - 2f_{шmax}}{f_{шmin} \cdot f_{шmax}}\,.$$

Като заместим в $\Delta ш_2$ $T_и$ и $\Delta T_и$ с техните стойности, ще получим

$$\Delta ш_2 = \frac{U_{mш} \cdot f_{шmin}}{\pi f_ш} \sin \frac{\pi f_ш}{f_{шmin}} \sin \frac{3\pi f_ш}{f_{шmax}} \cos \pi f_ш \frac{3f_{шmin} - 2f_{шmax}}{f_{шmax}\, f_{шmin}}\,. \tag{27}$$

Коефициентът на потискане на шума при двукратно интегриране ще се определи от израза

$$NMR_2 = 20 \lg \frac{f_{шmin}}{\pi f_ш} + 20 \lg \sin \frac{\pi f_ш}{f_{шmin}} + 20 \lg \sin \frac{3\pi f_ш}{f_{шmax}} + 20 \lg \cos \pi f_ш \frac{3f_{шmin} - 2f_{шmax}}{f_{шmax}\, f_{шmin}}\,. \tag{28}$$

и за честотите $f_ш = f_{min}$ и $f_ш = f_{max}$ става безкрайност.

За граничните честоти на шума $f_{шmin}$ и $f_{шmax}$ коефициентът NMR2 се стреми към безкрайност. Интервалът $\Delta f = f_{шmax} - f_{шmin}$ между честотите може да се изменя чрез избор на различни стойности за Δ Ти. При това коефициентът на потискане на шума за централната честота на диапазона нараства при намаляване на интервала Δf.

Изводи:

1. Предложена е методика за оценка на влиянието на хармоничните шумове върху точността на интегриращите цифрови волтметри. Направен е анализ и са получени изрази за грешката и коефициента на потискане на шума за тези цифрови волтметри за случаите, когато времето за първия такт за интегриране не е кратно на периода на шумовете за реални интегратори и за случаите, когато честотата на шумовото напрежение се изменя в процеса на измерването.

2. Направеният анализ и получените изрази могат да се използуват като алгоритъм за повишаване на точността на интегриращите цифрови волтметри. Въз основа на тях са дадени и оценки за намаляване на грешката на тези волтметри, дължаща се на хармоничните шумове.

Литература:

1. Орнатский П. Автоматические измерения и приборы, Киев 1980.
2. Под редакцией Дж. Коннели, Аналоговые интегральные схемы, издательство "Мир", Москва 1977.