

УДК 621.317

С. П. Кононов, канд. техн. наук, доц.;

О. М. Мальченко, студ.;

Л. М. Гранатов

## ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ФОРМУВАННЯ ЧАСТОТНИХ МІТОК У ПАНОРАМНИХ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДАХ

*Запропоновано метод зменшення динамічної похибки формування частотних міток у панорамних радіовимірювальних приладах. Проаналізовано причини її виникнення, отримано вирази для кількісної оцінки динамічної похибки та виграшу від використання запропонованого методу.*

### Вступ

Радіовимірювальні прилади, призначені для дослідження частотних характеристик, є невід'ємним елементом парку вимірювальної техніки, що необхідна для контролю параметрів телекомунікаційної апаратури та ліній зв'язку. Пристрої, що здійснюють формування частотних міток, визначають точність відліку частоти такими приладами. У похибці формування частотних міток є динамічна складова, зменшення якої дозволить підвищити точність вимірювань, а також підняти швидкодню радіовимірювального приладу.

### Постановка задачі

Основною задачею є аналіз відгуку вузькосмугового формувача міток на дію напруги з частотною модуляцією за лінійним законом та розробка методу зменшення динамічної похибки під час формування частотних міток.

Для досягнення поставленої задачі необхідно:

- визначити причину виникнення динамічної похибки під час роботи пристроїв формування частотних міток;
- розробити вдосконалений формувач частотних міток;
- виконати кількісний аналіз зменшеної динамічної похибки формування частотних міток запропонованим методом.

### Розв'язання задачі

В засобах ідентифікації частотних міток (формування міток та визначення їх частоти) застосовуються різні частотнозалежні вузли: фільтри нижніх частот, смугові фільтри і т. д. У разі впливу на такі вузли сигналу із лінійно-змінною частотою форма відклику [1] суттєво залежить від перехідних явищ в них і не повторює форму їх амплітудно-частотної (АЧХ), фазо-частотної (ФЧХ) характеристики. Для опису процесів, що відбуваються, введено поняття динамічної амплітудно-частотної характеристики (ДАЧХ). Основні відмінності ДАЧХ від АЧХ полягають у відносному зменшенні максимуму кривої, зміщенні положення максимуму по осі частот, відносному розширенні резонансної кривої на рівні 3 дБ, а також у виникненні осциляцій за великих швидкостей зміни миттєвої частоти [2]. У [3] розглядаються фазові явища в частотнозалежних вузлах під впливом напруги з частотною модуляцією за лінійним законом. Аналогічно відмічені відмінності динамічної ФЧХ (ДФЧХ) від ФЧХ чотириполюсника: зміщення моменту переходу фази через особливу точку  $\left(0, \pm \frac{\pi}{2}\right)$  в бік зміни частоти, зменшення максимуму похідної ДФЧХ, виникнення додаткових екстремумів ДФЧХ.

Отримані в [2, 3] результати справедливі для випадку, коли діюча напруга частотномодульована за пилкоподібним законом. Період модуляції  $T$  має бути таким, щоб новий цикл мав практично нульові початкові умови, тобто усі перехідні процеси від попереднього впливу закінчились.

В пристроях, що реалізовані за методом резонансних фільтрів (рис. 1), в якості частотнозалежних

вузлів використовуються LC-коливальні ланки другого порядку.

На фільтри впливає напруга  $U(t) = U \cos(2\pi f_H t + \pi \gamma t^2)$ , причому  $f_H \leq f_{p1}$ . Відклики  $y_i(t)$  додаються аналоговим суматором

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t).$$

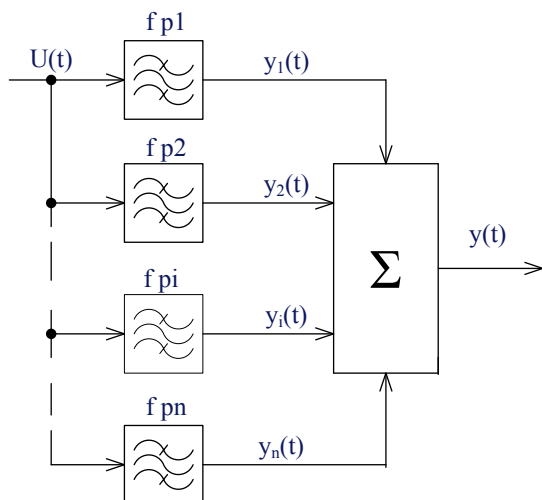


Рис. 1. Формування частотних міток за методом резонансних фільтрів

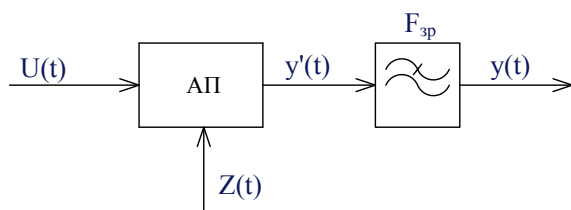


Рис. 2. Формування частотних міток за методом «нульового биття»

Максимуми відкликів кожного частотнозалежного вузла у вихідному сигналі  $y(t)$  рознесені в часі і є ознакою того, що миттєва частота напруги  $U(t)$  пройшла через значення резонансної частоти  $f_{p1}$  відповідного фільтра.

Таким чином, зміщення максимуму ДАЧХ за віссю частот через перехідні процеси буде впливати на точність відліку частоти, з'являється динамічна складова похибки  $\delta$ .

У панорамних радіовимірювальних приладах з часовою розгорткою найчастіше застосовується метод формування частотних міток за «нульовим биттям» (рис. 2).

«Нульові биття» у вигляді сигналу  $y(t)$ , миттєва частота якого мала, виділяються ФНЧ з частотою зрізу  $F_{зр} \ll f_0$  із напруги  $y'(t) = U(t) \cdot Z(t)$

на виході аналогового помножувача (АП). Якщо напруга  $Z(t)$  є монохроматичним коливанням з частотою  $f_0$ , то обвідна відклику  $y(t)$  близька до максимуму в момент рівності  $f(t) = f_0$ , де  $f(t)$  — поточна частота напруги  $U(t)$ . Якщо спектр напруги  $Z(t)$  багатий гармоніками, частота яких кратна  $f_0$ , «нульові биття» будуть виникати всякий раз, коли  $f(t) = n f_0, n = 1, 2, 3, \dots$

Цей метод також має недолік — із зменшенням частоти  $f_0$  за інших незмінних параметрів збільшується динамічна похибка формування частотних міток. Вона зростає через зміщення максимуму відклику в бік зміни частоти, «притуплення» відкликів, накладання один на одного.

Відомий спосіб кількісної оцінки динамічних впливів, оснований на представленні динамічного коефіцієнта передачі  $K_D$  кола у вигляді ряду за похідними статичного коефіцієнта передачі  $K$  [4]. За цим способом для лінійної зміни частоти отримані асимптотичні вирази, що визначають форму ДАЧХ найпростіших лінійних кіл другого порядку:

$$\delta(\Delta f_p) = \frac{\Delta f_{ДР} - \Delta f_p}{\alpha} = 2\mu; \tag{1}$$

$$\delta(\Delta f_{ПР}) = \frac{\Delta f_{ДПР} - \Delta f_{ПР}}{\Delta f_{ПР}} = 1,25\mu^2; \tag{2}$$

$$\delta(K) = \frac{(|\dot{K}|_{\text{МАКС}} - |\dot{K}_D|_{\text{МАКС}})}{|\dot{K}_D|_{\text{МАКС}}} = 0,5\mu^2; \tag{3}$$

де  $\delta(\Delta f_p)$  — зміщення максимуму;  $\delta(\Delta f_{ПР})$  — відносне розширення кривої на рівні  $-3$  дБ або відносне розширення смуги пропускання;  $\delta(K)$  — відносне зменшення максимуму кривої;  $\mu = \frac{\gamma}{\alpha^2}$  —

безрозмірний параметр;  $\gamma$  — швидкість зміни частоти;  $\alpha$  — коефіцієнт затухання;  $f_p$  — резонансна частота;  $Q$  — добротність.

Формули (1—3) справедливі для малих значень  $\mu$  ( $\mu < 0,1$ ). У [5] розроблена методика розрахунку  $\delta(\Delta f_p)$ ,  $\delta(\Delta f_{\text{ПР}})$ ,  $\delta(K)$  в ширшому діапазоні зміни параметра  $\mu$ , згідно з якою динамічні похибки  $\delta$  подаються у вигляді дробово-раціональних функцій:

$$\delta(\Delta f_p) = \frac{2\mu}{1 + 0,52\mu}; \quad (4)$$

$$\delta(\Delta f_{\text{ПР}}) = \frac{1,25\mu^2}{1 + 0,8\mu + \mu^2}; \quad (5)$$

$$\delta(K) = \frac{0,5\mu^2}{1 + 2,4\mu + 1,5\mu^2}. \quad (6)$$

За формулами (4—6)  $\delta$  обчислюється з похибкою не більше  $\pm 7\%$  зі зміною параметра  $\mu$  в межах  $0 \dots 2$ .

Для зменшення динамічних похибок пропонується спосіб, згідно з яким сигнал  $y'(t)$ , що подається на частотозалежний вузол, підноситься до квадрата (рис. 3).

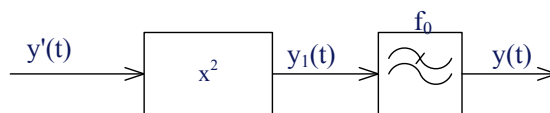


Рис. 3. Включення квадратора в коло формування міток

Рівняння, що зв'язує напругу на вході і виході квадратора [6], має вигляд

$$y_1(t) = k[y'(t)]^2,$$

де  $k$  — постійний коефіцієнт перетворення. У випадку, якщо

$$y'(t) = U(t) = U \cos(2\pi f_H t + \pi \gamma t^2),$$

то на виході квадратора маємо:

$$y_1(t) = \frac{1}{2}kU^2 + \frac{1}{2}kU^2 \cos(2\pi f'_H t + \pi \gamma' t^2). \quad (7)$$

До квадратора миттєва частота сигналу

$$f(t) = f_H + 2\pi \gamma t,$$

на його виході

$$f'(t) = f'_H + 2\pi \gamma' t,$$

де  $f'_H = 2f_H$ ,  $\gamma' = 2\gamma$ .

Часові залежності частоти на вході і виході квадратора показані на рис. 4а.

В системах, побудованих за методом «нульових биттів», напруга  $y'(t)$  від АП надходить на вхід фільтра нижніх частот із частотою зрізу  $F_{\text{ЗР}}$  (див. рис. 2). Подамо цю напругу на вхід фільтра через квадратор. Миттєва частота напруги  $y'(t)$  на вході квадратора визначається виразом  $f(t) = F_{\text{ЗР}} - \gamma t$  на ділянці зміни часу від 0 до  $\frac{F_{\text{ЗР}}}{\gamma}$ , а в інтервалі часу від  $\frac{F_{\text{ЗР}}}{\gamma}$  до

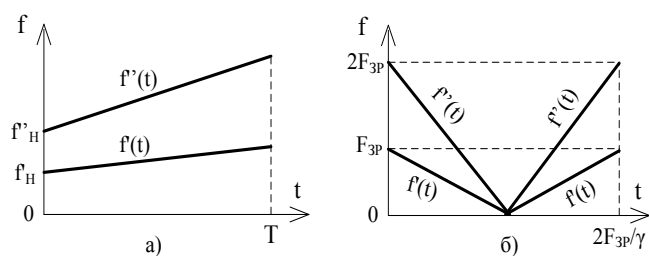


Рис. 4. Значення частоти на вході і виході квадратора

$\frac{2F_{ЗР}}{\gamma}$  частота  $f(t) = \gamma \left( t - \frac{F_{ЗР}}{\gamma} \right)$ . Аналогічно, в цих же інтервалах часу миттєва частота напруги  $y_1(t)$  на виході квадратора:

$$f'(t) = F'_{ЗР} - \gamma't \quad \text{або} \quad f'(t) = \gamma' \left( t - \frac{F'_{ЗР}}{\gamma'} \right),$$

де  $F'_{ЗР} = 2F_{ЗР}$ ,  $\gamma' = 2\gamma$ .

Часові залежності частоти на вході і виході квадратора в цьому випадку показані на рис. 4б.

У загальному випадку, у разі послідовного піднесення до квадрата  $m$  разів, швидкість зміни частоти збільшиться у  $2m$  разів. При цьому постійну складову (7) на виході квадраторів необхідно відфільтрувати і на вхід наступного квадратора подавати тільки змінну складову.

В пристроях, побудованих за методами резонансних фільтрів та «нульових биттів», тривалість сформованої мітки прямопропорційна смузі пропускання частотнозалежних вузлів. У випадку одноланкового RC-фільтра нижніх частот смуга пропускання, як відомо, дорівнює

$$F_{ЗР} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Якщо застосовується одиночний коливальний LC-контур, то його смуга пропускання

$$\Delta f_{ПР} = \frac{f_P}{Q},$$

де  $f_P$  — резонансна частота;  $Q$  — добротність.

Для того, щоб під час введення квадратора тривалість частотної мітки не змінювалась, необхідно у два рази збільшити смугу пропускання  $F'_{ЗР}$  або  $\Delta f'_{ПР}$  ( $F'_{ЗР} = 2F_{ЗР}$  для RC-фільтрів,

$\Delta f'_{ПР} = 2\Delta f_{ПР} = \frac{2f_P}{Q} = \frac{f'_P}{Q}$  — для LC-фільтра). Якщо використовується  $m$  послідовно з'єднаних квадраторів, то, відповідно, у  $2m$  разів збільшується смуга пропускання.

В схемі з  $m$ -квадраторами безрозмірний параметр

$$\mu' = \frac{\gamma'}{(\alpha')^2} = \frac{2m\gamma}{(2m\alpha)^2} = \frac{\mu}{2m}$$

зменшується в  $2m$ -разів. Таким чином, у разі збереження такої ж тривалості частотної мітки, з введенням послідовно з'єднаних квадраторів параметр  $\mu$ , що входить до формул для розрахунку динамічних спотворень, зменшується. Це еквівалентно зниженню впливу перехідних процесів на форму відклику, тобто частотної мітки:

$$\delta'(\Delta f_P) = \frac{\mu}{m + 0,26\mu};$$

$$\delta'(\Delta f_{ПР}) = \frac{1,25\mu^2}{4m^2 + 1,6m\mu + \mu^2};$$

$$\delta'(K) = \frac{0,5\mu^2}{4m^2 + 4,8m\mu + 1,5\mu^2}.$$

Відповідно досягається зменшення спотворень форми ДАЧХ:

$$\frac{\delta(\Delta f_P)}{\delta'(\Delta f_P)} = \frac{2(m + 0,26\mu)}{1 + 0,52\mu};$$

$$\frac{\delta(\Delta f_{ПР})}{\delta'(\Delta f_{ПР})} = \frac{4m^2 + 1,6m\mu + \mu^2}{1 + 0,8\mu + \mu^2};$$

$$\frac{\delta(K)}{\delta'(K)} = \frac{4m^2 + 4,8m\mu + 1,5\mu^2}{1 + 2,4\mu + 1,5\mu^2}.$$

На рис. 5—7 показані відповідні залежності, що характеризують зменшення спотворень форми ДАЧХ з введенням квадраторів.

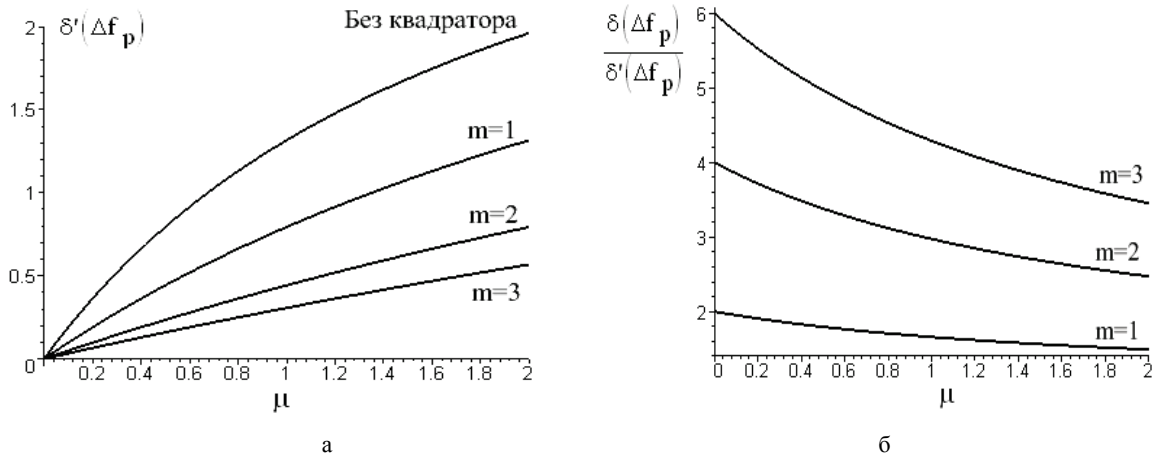


Рис. 5. Зміщення максимуму ДАЧХ: а — з включенням  $m$  квадраторів; б — виграш в зміщенні ДАЧХ

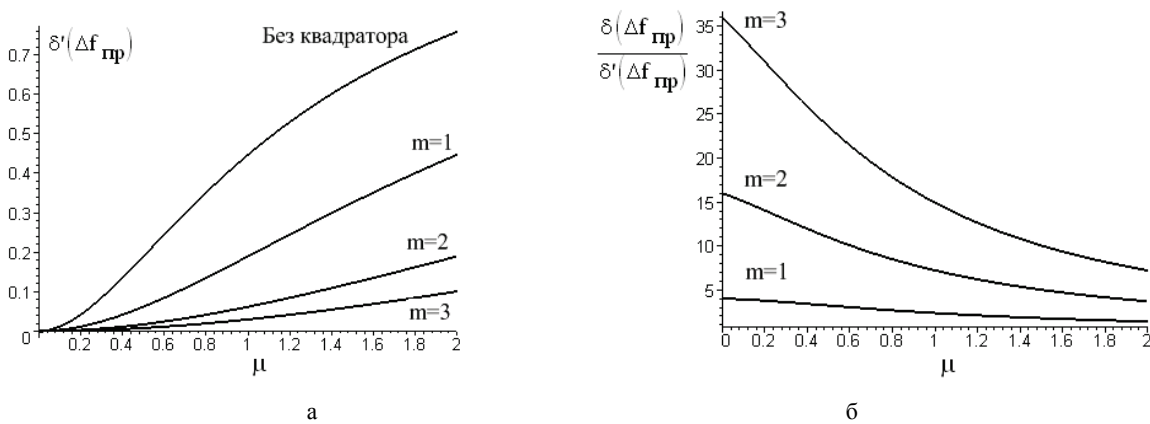


Рис. 6. Відносне розширення ДАЧХ: а — з включенням  $m$  квадраторів; б — виграш у звуженні ДАЧХ

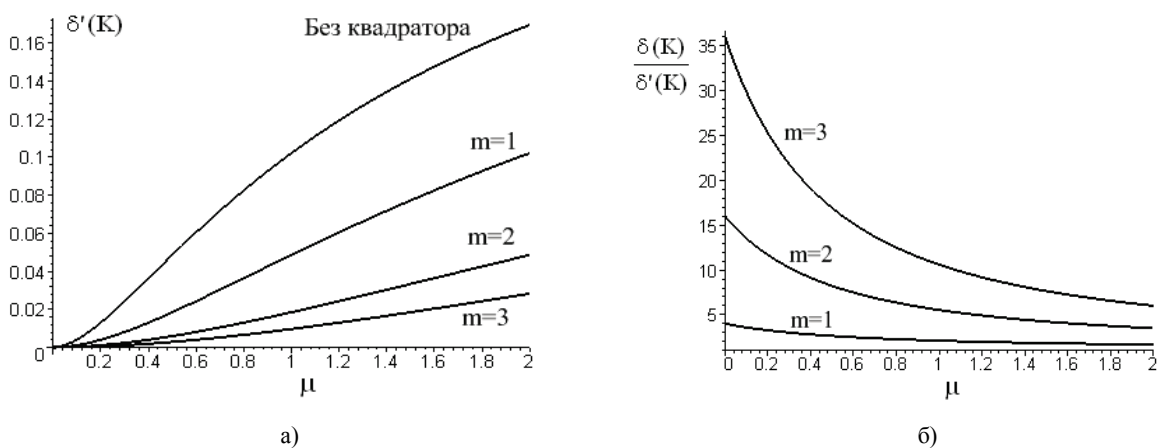


Рис. 7. Відносне зменшення максимуму ДАЧХ: а — з включенням  $m$  квадраторів; б — виграш у зменшенні максимуму ДАЧХ

За резонансною частотою  $f_p$  і частотою зрізу  $F_{зр}$  фільтра на виході одного або кількох послідовно з'єднаних квадраторів визначають вимоги до широкосмуговості останніх.

В пристроях формування частотних міток за методом «нульових биттів» перед квадраторами необхідно встановлювати додатковий ФНЧ, що ослаблює вплив вищих складових перетворення частоти.

Частота зрізу  $F_{ЗР.Д}$  цього фільтра обирається за умови

$$\frac{f_0}{2} > F_{ЗР.Д} > F_{ЗР}.$$

Запропонований метод знайде застосування у панорамних радіовимірювальних приладах, в яких формуються мітки з малим частотним кроком, а також у вузлах інформаційно-вимірювальних систем з частотною розгорткою, що оперують з напругою, миттєва частота якої швидко змінюється.

### Висновки

1. Динамічна складова похибки у пристроях формування частотних міток за методами резонансних фільтрів і «нульових биттів» виникає через перехідні процеси у частотозалежних вузлах і призводить до зміни форми динамічної амплітудно-частотної характеристики.

2. З метою зменшення впливу динамічної похибки на точність формування мітки пропонується включення квадратора перед резонансними фільтрами або на виході аналогового помножувача сигналів перед фільтром нижніх частот. Застосування квадратора дозволяє зменшити вплив інерційності фільтрів на форму відклику і наближає її до форми амплітудно-частотної характеристики.

3. Отримано вирази для кількісної оцінки динамічної похибки в пристроях формування частотних міток з включеними перед частотозалежними вузлами квадраторами.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кочемасов В. Н. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией / Виктор Неофидович Кочемасов, Л. А. Белов, В. С. Окочешников. — М. : Радио и связь, 1983. — 192 с.
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ / Александр Александрович Харкевич. — М. : Либроком, 2009. — 240 с. — ISBN 978-5-397-00256-1.
3. Виноцкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ / Аркадий Савич Виноцкий. — М. : Советское радио, 1969. — 548 с.
4. Турбович И. Т. Динамические частотные характеристики избирательных систем / И. Т. Турбович // Радиотехника. — 1957. — Т. 12, № 11. — С. 39 — 49.
5. Линников И. Н. Расчет динамических погрешностей при прохождении через резонанс / И. Н. Линников // Метрология. — 1981. — № 7. — С. 21—28.
6. Алексеенко А. Г. Основы микросхемотехники / Андрей Геннадьевич Алексеенко. — М. : Бином. Лаборатория знаний, 2004. — 448 с. — ISBN 978-5-94774-002-8.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення

Стаття надійшла до редакції 17.02.11

Рекомендована до друку 1.03.11

**Кононов Сергій Павлович** — доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення,  
**Мальченко Олександр Миколайович** — студент Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Гранатов Леонід Миколайович** — викладач Вінницького технічного коледжу, Вінниця