

рис.4. Цифрові осцилограми зворотної напруги та струму на вентиля після фільтрації

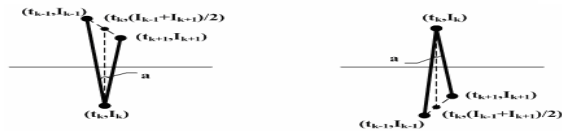


рис.5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутації

Рис. 5. Форма викидів струмів та напруг на вентилях під час комутації

Виключити вплив цього явища можна за допомогою запропонованого вище фільтра. Описаний процес можна проілюструвати подібними до відкриття–закриття вентилів схемами (рис. 5). Щоб відчуті дію фільтра в повному обсязі, варто порівняти осцилограми напруги вентиля без використання фільтра (рис1.) та з його використанням (рис. 4).

Оптимізація перемикання комутуваних вентилів одночасно забезпечує ліквідацію викидів на кривих зворотної напруги вентилів. Фільтрування викидів струмів чи напруг здійснюється за одним і тим самим алгоритмом, згідно з (2) і (3).

Як видно з рис. 5, використання алгоритму спряження розв'язань системи рівнянь дає змогу усунути числові похибки і забезпечити адекватність моделювання електромагнітних процесів в електричних схемах з вентиляльними елементами.

7. Висновок. Запропонований алгоритм оптимізації комутацій вентиляльних елементів дає змогу забезпечити адекватність моделювання електромагнітних процесів у схемах з вентиляльними елементами, під час їхнього закриття, в разі формування математичних моделей з використанням неявних багатокрокових числових методів.

1. Холл Дж. і Уатт Дж. *Современные численные методы решения дифференциальных уравнений* / Под ред. А.Д. Горбунова. – М., 1979. 2. Фильц Р.В. *О численном интегрировании и дифференциальных уравнениях трансформатора при кусково-линейной аппроксимации характеристик намагничивания* // *Электромеханика*. – 1974. – № 8. – С. 929–930. 3. Демидович Б.П., Марон Г.А. *Основы вычислительной математики*. – М., 1970.

УДК 536.53

І.П. Микитин

Національний університет “Львівська політехніка”
кафедра інформаційно-вимірвальних технологій

ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМОВИХ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

© Микитин І.П., 2006

Розглянуто основні концепції створення інтелектуальних фільтрів, що можуть адаптуватися до зміни параметрів завади, яка спотворює корисний шумовий сигнал. Проаналізовано залежність похибки швидкого перетворення Фур'є від розрядності АЦП.

There were discussed the basic conceptions of creation for intellectual filters. They could be adapted to parameters' variations of hindrance which distorted the useful noise signal. Fourier rapid transformation's error was analyzed, depending on the bit's quantity of ADC.

Постановка проблеми. Однією з найактуальніших проблем шумової термометрії є спотворення корисного сигналу (шумової напруги) зовнішніми завадами, які виникають за рахунок наведень від потужних джерел змінної напруги, та внутрішніми, які створюються всередині вторинної апаратури шумових термометрів*. Мінімізувати вплив завади в багатьох випадках вдається використанням аналогових та цифрових фільтрів, екрануванням аналогової частини, гальванічним розділенням аналогових та цифрових кіл. Проте часто повністю подолати вплив завади на корисний сигнал не вдається.

Мета досліджень. Підвищення завадостійкості шумових термометрів за рахунок використання цифрових фільтрів на основі швидкого перетворення Фур'є.

Аналіз попередніх розробок. Дослідження вторинної апаратури шумових термометрів (ШТ) показали, що у певних випадках рівень завади може перевищувати корисний сигнал у декілька разів. Вплив зовнішньої завади особливо сильно проявляється, якщо поблизу приладу працює потужне джерело напруги частотою 50 Гц або релейні перемикачі потужних струмових кіл. Внутрішня завада виникає за рахунок взаємних наведень між каналами кореляційного підсилювача, впливом на високочутливі вхідні кола підсилювача імпульсної завади, яку генерують цифрова частина вторинного засобу та комп'ютер. На рис. 1 зображено підсилений тепловий шумовий сигнал, який спотворений завадами, а на рис. 2 – спектр цього сигналу.

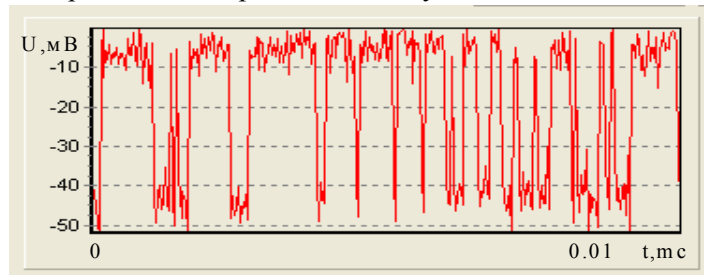


Рис.1. Шумовий сигнал первинного перетворювача, спотворений завадами.

Рис. 1. Шумовий сигнал первинного перетворювача, спотворений завадами

Для теплового шуму спектр сигналу повинен бути рівномірним. Різниця між гармоніками повинна бути неістотно. Проте спостерігаються гармоніки, які набагато перевищують середній рівень. Тому обов'язковим є використання фільтрів для зменшення впливу неінформативних гармонік, які зумовлені не тепловими процесами всередині матеріалу первинного перетворювача, а внутрішніми та зовнішніми завадами. Причому потрібно використовувати фільтр складної конфігурації, який буде поєднувати смуговий фільтр для створення робочої частотної смуги шумового термометра та режекторні фільтри на певні частоти, яких може бути доволі багато. Крім того, потрібно враховувати, що джерела зовнішньої завади можуть бути різними при зміні дислокації шумового термометра та спотворювати корисний сигнал на інших частотах. У такому разі фільтр повинен ще й могли адаптуватися до цих змін та перелаштувати коефіцієнти фільтрації на певних частотах. Створення аналогових та цифрових фільтрів такої будови є складною схемотехнічною проблемою.

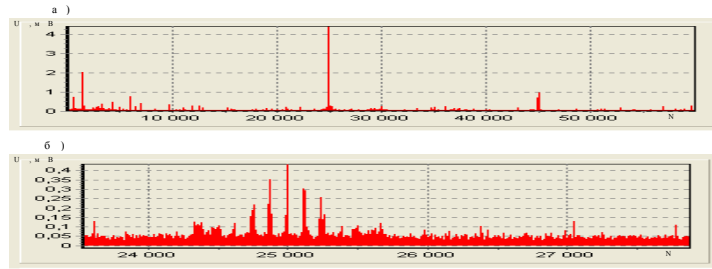


Рис. 2. Спектр шумового сигналу первинного перетворювача, спотворений завадами: а – частотний діапазон 1000 – 60000 Гц, б – частотний діапазон 20000 – 30000 Гц

а

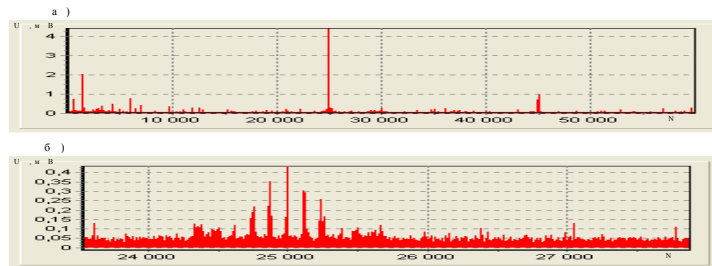


Рис. 2. Спектр шумового сигналу первинного перетворювача, спотворений завадами: а – частотний діапазон 1000 – 60000 Гц, б – частотний діапазон 20000 – 30000 Гц

б

Рис. 2. Спектр шумового сигналу первинного перетворювача, спотворений завадами:
а – частотний діапазон 100–60000 Гц;
б – частотний діапазон 20000–30000 Гц

Тому для підвищення завадостійкості шумових термометрів поряд з аналоговими та цифровими фільтрами доцільне використання фільтрації на основі швидкого перетворення Фур'є. Потрібно проаналізувати:

- 1 спосіб фільтрації;
- 2 похибку, яку вносить перетворення Фур'є за рахунок дискретизації корисного сигналу за рівнем.

Спосіб фільтрації. Використання сучасних можливостей комп'ютерної та цифрової техніки дає змогу створювати ШТ, які працюють у режимі реального часу, здійснюють квантування за рівнем шумових сигналів, передають швидкими інтерфейсами (типу USB) дані від ШТ до персонального комп'ютера, де здійснюють математичне опрацювання результатів вимірювання, зокрема, швидке перетворення Фур'є, та дають змогу проглядати спектр корисного сигналу. Структурна схема такого ШТ подана на рис. 3.

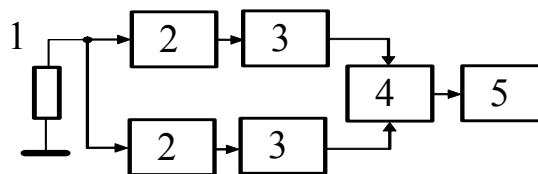


Рис. 3. Структурна схема шумового термометра.
1 – первинний перетворювач; 2 – кореляційний підсилювач; 3 – АЦП; 4 – USB інтерфейс; 5 – персональний комп'ютер.

Рис. 3. Структурна схема шумового термометра:
 1 – первинний перетворювач; 2 – кореляційний перетворювач; 3 – ЦАП; 4 – USB інтерфейс;
 5 – персональний комп'ютер

Роботою таких ШТ може керувати оператор, коли більшість уставок та функцій роботи ШТ вибирають вручну, або ШТ може працювати в автономному режимі, коли він бере на себе усі повноваження з вимірювання термодинамічної температури.

У першому випадку оператор повинен переглянути спектр корисного сигналу, щоб правильно налаштувати фільтр. Для цього потрібно виміряти шумову напругу при незмінній температурі первинного перетворювача та виконати перетворення Фур'є. Визначивши найменш засмічений завадами частотний діапазон, вибирають робочу частотну смугу шумового термометра та вносять зміни щодо нижньої та верхньої частот смугового фільтра. Проте фільтрацію окремих гармонік, які явно перевищують середнє значення, здійснює шумовий термометр у вибраному оператором діапазоні частот.

З іншого боку, всі дії з вибору частотного діапазону може брати на себе ШТ. У такому разі ШТ має працювати за певним алгоритмом, який дасть змогу ШТ правильно визначити оптимальний режим роботи фільтра.

Залежно від частоти дискретизації АЦП f_{ACP} вибирають повний частотний діапазон за формулою

$$N_f = \frac{T_{vym} \cdot f_{ACP}}{2}, \quad (1)$$

де N_f – кількість частот, починаючи з нульової гармоніки – сталої складової корисного сигналу, T_{vym} – час вимірювання. (Якщо $T_{vym} = 1$ с, крок зміни частоти при перетворенні Фур'є $\Delta f = 1$ Гц, при $T_{vym} = 10$ с – $\Delta f = 0.1$ Гц і т.д.)

На початку роботи ШТ здійснює налаштування фільтра. Виконавши вимірювання шумової напруги та перетворення Фур'є, ШТ визначає густину гармонік, які істотно перевищують середній рівень у всьому частотному діапазоні. Середній рівень амплітуди A_{ser} визначають за формулою

$$A_{ser} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=0}^{N_f} A_i, \quad (2)$$

де A_i – амплітуди гармонік.

Маючи інформацію про густину завади, ШТ вибирає діапазон частот, в якому густина є найменшою. Обмежують верхню та нижню частоти. Далі перевіряються усі гармоніки у вибраному діапазоні. Номери гармонік, які перевищують рівень $\beta \cdot A_{ser}$, запам'ятовують для подальшого використання при фільтрації шумового сигналу. Коефіцієнт $\beta = 1..5$ використовують для масштабування рівня, за яким обмежуються гармоніки.

При подальших вимірюваннях фільтрація корисного сигналу полягає в присвоєнні значення “нуль” усім гармонікам, які були визначені як спотворені завадою.

Оцінка похибки. Для визначення залежності похибки перетворення Фур'є від розрядності АЦП виконано моделювання з використанням програмного пакета C++Builder 6. Розроблено програму, яка дає змогу створювати тестовий сигнал певної амплітуди та частоти, здійснювати швидко перетворення Фур'є та визначати похибку в частотному діапазоні $\Delta f = 100$ кГц. Розраховували максимальну δ_m та середню δ_s похибка перетворення Фур'є на низькому ($0.1U_m$), середньому ($0.5U_m$) та високому ($0.9U_m$) рівні корисного сигналу за формулами

$$\delta_m = \frac{\Delta U_{\max}}{U_m} \cdot 100,$$

$$\delta_s = \frac{\Delta U_{\text{ser}}}{U_m} \cdot 100,$$

$$\Delta U_{\text{ser}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \Delta U_i, \quad (3)$$

де U_m – номінальне значення амплітуди гармоніки, ΔU_{\max} – максимальна різниця між номінальним значенням амплітуди та i -ми гармоніками, ΔU_{ser} – середнє значення гармонік у частотному діапазоні, ΔU_i – різниця між номінальним значенням амплітуди та i -ю гармонікою, n – кількість гармонік у частотному діапазоні.

Результати моделювання зведено у таблиці та подано графічно на рис.4.

Похибка перетворення Фур'є від розрядності АЦП

Розрядність АЦП (максимальна кількість рівнів)	Відносна похибка	0.1 U_m	0.5 U_m	0.9 U_m
1	2	3	4	5
біт	δ_m (%)	6.37	1.15	0.58
	δ_s (%)	6.17	1.07	0.58
біт	δ_m (%)	3.66	0.57	0.31
	δ_s (%)	2.83	0.52	0.28
біт	δ_m (%)	1.65	0.26	0.14
	δ_s (%)	1.34	0.25	0.14
біт	δ_m (%)	0.67	0.22	0.07
	δ_s (%)	0.66	0.12	0.07
біт	δ_m (%)	0.47	0.11	0.04
	δ_s (%)	0.32	0.06	0.034
біт	δ_m (%)	0.22	0.04	0.019
	δ_s (%)	0.16	0.03	0.016
біт	δ_m (%)	0.11	0.017	0.009
	δ_s (%)	0.07	0.015	0.0086
біт	δ_m (%)	0.06	0.0085	0.0055
	δ_s (%)	0.038	0.0077	0.0045
біт	δ_m (%)	0.023	0.0041	0.0024
	δ_s (%)	0.019	0.0038	0.0021

Продовження таблиці

1	2	3	4	5
біт	δ_m (%)	0.012	0.0024	0.0011
	δ_s (%)	0.0097	0.0019	0.001
біт	δ_m (%)	0.005	0.001	0.00058
	δ_s (%)	0.0048	0.00097	0.00053
біт	δ_m (%)	0.0033	0.00058	0.00038
	δ_s (%)	0.0025	0.0005	0.00026
біт	δ_m (%)	0.0018	0.00033	0.00017
	δ_s (%)	0.0012	0.00025	0.00014
Типчисла біти	δ_m (%)	$9.7 \cdot 10^{-12}$	$9.7 \cdot 10^{-12}$	$9.7 \cdot 10^{-12}$
	δ_s (%)	$9.7 \cdot 10^{-15}$	$9.5 \cdot 10^{-15}$	$9.6 \cdot 10^{-15}$

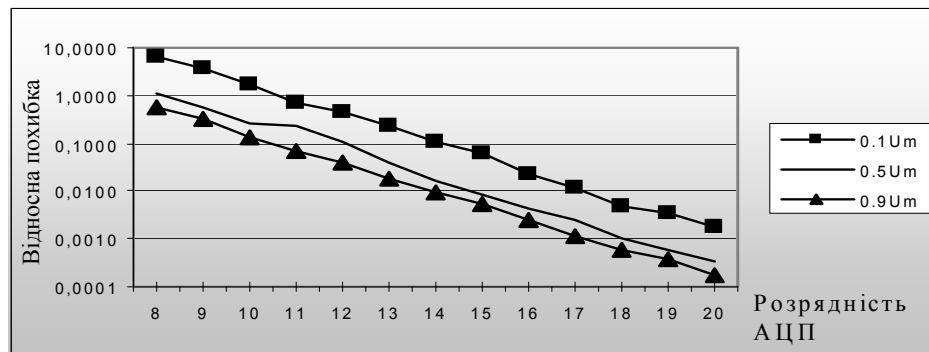


Рис.4. Залежність максимальної відносної похибки перетворення Фур'є від розрядності АЦП.

Рис. 4. Залежність максимальної відносної похибки перетворення Фур'є від розрядності АЦП

В останніх двох рядках таблиці подано похибку перетворення Фур'є при розрядності АЦП, яка відповідає роздільній здатності дійсного числа типу double (діапазон від $5 \cdot 10^{-324}$ до $1.7 \cdot 10^{308}$). Такого зменшення похибки можна досягнути при збільшенні розрядності АЦП.

Вибираючи АЦП для шумового термометра, потрібно враховувати, що корисний сигнал вимірюється у широкому частотному діапазоні. Амплітуда окремої гармоніки є набагато меншою за рівень сигналу, який квантується за рівнем. Крім того, завада може зменшити динамічний діапазон корисного сигналу, особливо коли рівень завади є домінуючим. На рис. 1 та рис. 2 можна спостерігати, що при рівні завади близько 40 мВ та корисному сигналі 10 мВ середнє значення амплітуди гармонік не перевищує 0.05 мВ. Тому потрібно орієнтуватися на похибку перетворення Фур'є на рівні 10–50 % від повного діапазону квантування.

Висновок. Сформовано основні концепції створення інтелектуальних фільтрів шумових сигналів, які можуть адаптуватися до зміни зовнішніх та внутрішніх завод вторинної апаратури ШТ. Розглянуто та отримано залежність похибки швидкого перетворення Фур'є від розрядності АЦП на низькому (0.1 Um), середньому (0.5 Um) та високому (0.9 Um) рівні корисного сигналу, що дає змогу оптимізувати вибір АЦП для шумового термометра.

Надалі планується виконання теоретичних та експериментальних досліджень з визначення оптимального рівня обмеження гармонік, частотного діапазону роботи шумового термометра та оптимізації алгоритму адаптації фільтра до змінної у часі та просторі завади.

УДК 621.395

М.І. Паламар

Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя,
кафедра приладів та контрольно-вимірювальних систем

КЕРУВАННЯ СЛІДКУЮЧИМИ АНТЕНАМИ ІЗ НЕВИЗНАЧЕНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ СУПРОВОДУ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

© Паламар М.І., 2006

Запропонована структура і алгоритм роботи системи керування слідкуючими антенними комплексами для супроводу низькоорбітальних космічних апаратів на базі