

## ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІЇ РОЗГОРТКИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СКАНУВАЛЬНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

© Татарин В.Я., Петровська Г.А., 2008

V.Ya. Tataryn, H.A. Petrovska

## OPTIMIZATION OF THE FUNCTION SCAN OF THE PIEZOCERAMIC TRANSDUCER FOR SCANNING INTERFEROMETR

© Tataryn V.Ya., Petrovska H.A., 2008

Змодельовано та реалізовано функцію розгортки п'єзокоректора сканувального інтерферометра Фабрі-Перо з великою лінійною ділянкою та малим коефіцієнтом гармонік. Експериментально досліджена точність інтерференційних вимірювань з використанням оптимізованої функції розгортки.

The function scan of the piezoceramic transducer for scanning interferometer of Fabry-Perot with large linear range and low coefficient of the harmonic was modeled and realized. The accuracy of interference measurements with using the optimized function scan was experimental researched.

### Вступ

Для виконання прецизійних інтерференційних вимірювань часто використовують сканувальні інтерферометри типу Фабрі-Перо [1–3], в яких сканування реалізується за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів. Високої точності вимірювань при тому можна досягнути, якщо вимірювати в межах лінійної ділянки розгортки. Для забезпечення достатнього діапазону вимірювальної величини протяжність лінійної ділянки повинна бути якомога більшою. Відомо, що великими лінійними ділянками володіють пилкоподібні розгортки, однак вони спричиняють виникнення загасальних коливальних процесів при стрибкоподібній зміні переміщення чи швидкості сканувального елемента. Синусоїдальні розгортки ідеально відтворюють електричний сигнал, однак, володіють безмежно малою лінійною ділянкою.

Отже, для розширення діапазону вимірювальних величин та підвищення точності вимірювань необхідно шукати компромісне рішення, яке забезпечить отримання достатньої лінійної ділянки функції розгортки при невеликому коефіцієнті гармонік.

У цій роботі наведені результати оптимізації функції розгортки п'єзокоректора сканувального інтерферометра Фабрі-Перо.

### Формування оптимальної функції розгортки

Для реалізації сканувального інтерферометра як перетворювач було використано п'єзокоректор КП1-1, перевагою якого є можливість отримання великих переміщень (у межах кількох довжин хвиль  $\lambda$ ) без використання високовольного джерела напруги: при частоті сканування порядку 100 Гц переміщення на одну довжину хвилі  $\lambda$  досягається амплітудним значенням напруги близько 10 В. Це дає змогу використовувати для вимірювань прецизійну аналогову техніку і легко забезпечити диференційну нелінійність менше 0,5 %. Однак, як свідчать результати експери-

ментальних досліджень, під час використання пілкоподібних розгортки точного відтворення електричного сигналу досягнути практично неможливо внаслідок різко виражених механічних резонансів п'єзокераміки.

З метою моделювання оптимальної функції розгортки було виконано дослідження поведінки такої функції:

$$y(t) = \left( kt \frac{(\text{sign}(t - t_1 + p) + 1)(\text{sign}(p - t_1 - t))}{4} \right) + \frac{\text{sign}(t + t_1 - p) + \text{sign}(-p + t_1 - t) + 2}{2} \sin(2nt)$$

де  $k$  – коефіцієнт нахилу лінійної ділянки,  $\text{sign}(t)$  – одинична функція Хевісайда,  $t_1 - p$  і  $p - t_1$  – точки початку і закінчення лінійної ділянки розгортки,  $n$  – кратність розгортки.

Коефіцієнт нахилу, а також точки початку та закінчення лінійної ділянки розгортки визначали з умов рівності значень та похідних цієї функції в точках зшивання, тобто,

$$\begin{cases} k(p - t_1) = \sin(2n(p - t_1)) = -\sin(2nt_1) \\ k(t_1 - p) = \sin(2n(t_1 - p)) = \sin(2nt_1) \\ k = 2n \cos(2n(p - t_1)) = 2n \cos(2nt_1) \end{cases}$$

Як зрозуміло, перше і друге рівняння є еквівалентними. З двох останніх рівностей було знайдено трансцендентне рівняння для обчислення значень точок початку та закінчення лінійної ділянки розгортки та коефіцієнта нахилу лінійної ділянки

$$2n(p - t_1) \cos(2n \cdot t_1) + \sin(2nt_1) = 0$$

Ці значення отримали числовим способом, вони зведені в таблиці разом із значеннями амплітуди лінійної ділянки розгортки та амплітуди десятої гармоніки розкладу функції розгортки в ряд Фур'є.

#### Числові значення параметрів функцій розгортки

n	$t_1$	k	Амплітуда лінійної ділянки	Амплітуда десятої гармоніки
1/2	$\pi$	1	0	0
1	0,895	-0,435	0,977	$2,30 \cdot 10^{-3}$
2	0,416	-0,365	0,995	$6,79 \cdot 10^{-3}$
3	0,271	-0,349	0,998	$31,8 \cdot 10^{-3}$
4	0,202	-0,340	0,999	$45,3 \cdot 10^{-3}$
5	0,160	-0,332	0,999	$52,1 \cdot 10^{-3}$

З таблиці зрозуміло, що оптимальною є функція розгортки з кратністю  $n = 1$ , оскільки при достатній амплітуді лінійної ділянки вона забезпечує найменше значення амплітуди десятої гармоніки. Графік цієї функції показано на рис. 1. З графіка очевидно, що така функція розгортки забезпечує лінійність ходу п'єзокоректора протягом більшої частини періоду.

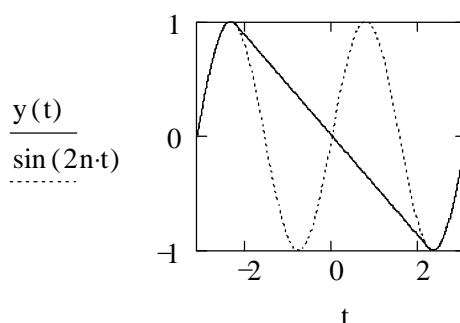
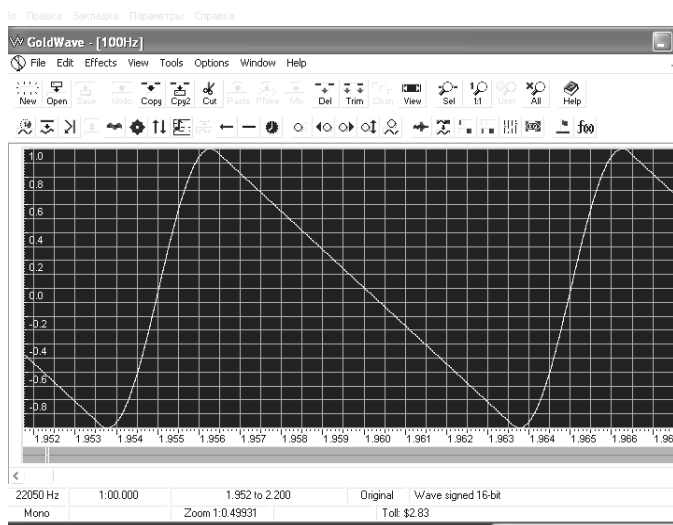
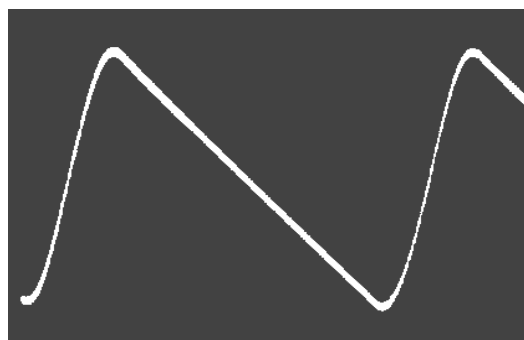


Рис. 1. Графік оптимізованої функції розгортки та синусоїди, в яку вшита лінійна ділянка

Ця функція розгортки була синтезована на ЕОМ за допомогою програми GoldWave (рис. 2, а) та відтворена за допомогою 16-бітного цифро-аналогового перетворювача.



а



б

Рис. 2. Синтезована за допомогою програми GoldWave функція розгортки (а) та осцилограма напруги, що подається на п'єзокоректор (б)

На рис. 2, б показана осцилограма напруги, що подається на п'єзокоректор.

### Дослідження лінійності ходу п'єзокоректора

Для дослідження роботи п'єзокоректора із синтезованою функцією розгортки була зібрана схема сканувального інтерферометра Фабрі-Перо (рис. 3). Промінь гелій-неонового лазера 1 через оптичну розв'язку надходить у сканувальний інтерферометр Фабрі-Перо, утворений дзеркалами 3 та 4. Дзеркало 4 кріпиться на досліджуваний п'єзокоректор 5. Сигнал з інтерферометра надходить на фотоприймач 6 і далі на формувач імпульсів 7 та комп'ютер 10. На п'єзокоректор 5 через суматор 9 подається напруга змодельованої розгортки з комп'ютера 10 та постійна напруга від блока живлення 8, що дає змогу змінювати положення інформаційних імпульсів з інтерферометра відносно функції розгортки.

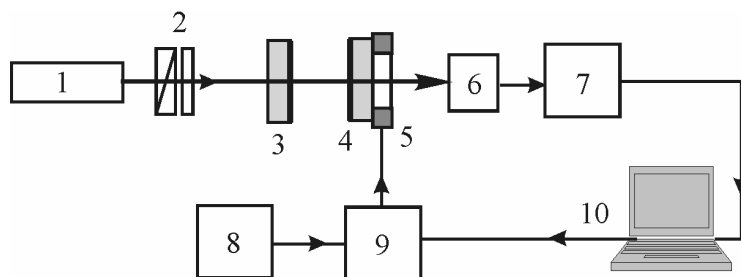


Рис. 3. Схема сканувального інтерферометра Фабрі-Перо для дослідження лінійності ходу п'єзокоректора

Сигнал зі сканувального інтерферометра надходить на фотоприймач 6 і далі на формувач прямокутних імпульсів 7 та комп'ютер 10.

Для виконання інтерференційних вимірювань використано метод часових інтервалів [4]. На рис. 4 показані часові діаграми роботи сканувального інтерферометра.

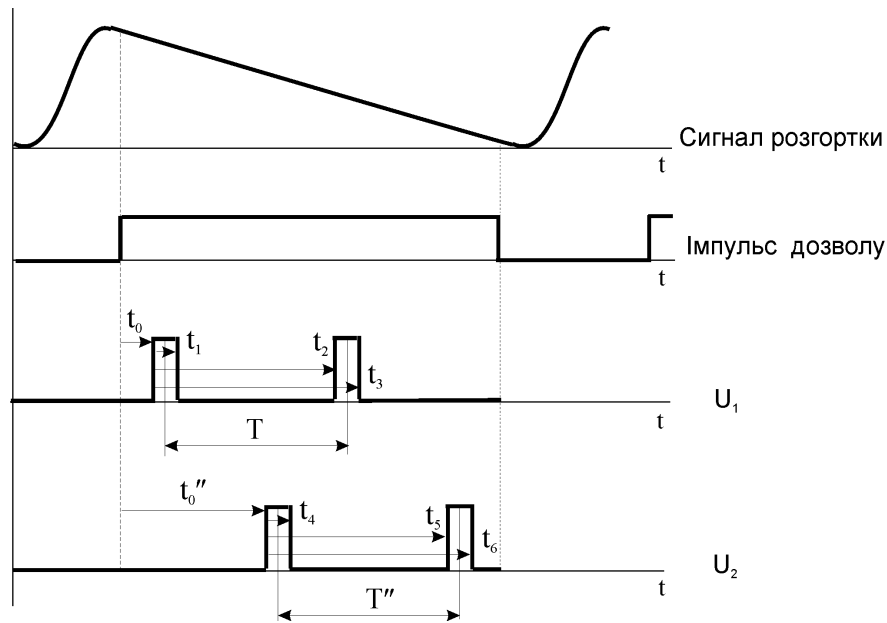


Рис. 4. Часові діаграми роботи сканувального інтерферометра

Вимірювання виконують у межах лінійної ділянки розгортки, що задається імпульсом дозволу. Положення інформаційних імпульсів щодо переднього фронту імпульсу дозволу ( $t_0'' > t_0$ ) регулюється зміною вихідної напруги блока живлення 8 ( $U_1 > U_2$ ). Така зміна напруги призводить до зміни середньої товщини п'єзокоректора 5, внаслідок чого інформаційні імпульси переміщуються щодо переднього фронту імпульсу дозволу, хоча оптична довжина інтерферометра є постійною. Якщо ж оптична довжина інтерферометра змінюватиметься внаслідок зміни показника заломлення всередині інтерферометра, то буде змінюватись як період інтерференційних смуг (інформаційних імпульсів), так і положення інформаційних імпульсів щодо переднього фронту імпульсу дозволу. При тому для достатньо значних змін оптичної довжини інтерферометра може виникнути ситуація, коли перший інформаційний імпульс займе те саме положення, що і до зміни цієї довжини, тоді як період між імпульсами є обов'язково обернено пропорційним цій довжині. Отже, саме період інтерференційних смуг є інформаційним параметром інтерферометра.

Пропускання сканувального інтерферометра Фабрі-Перо для будь-якої точки інтерференційної картини є періодичною функцією з періодом  $\frac{l}{2}$  [1]. Тоді для періоду інформаційних імпульсів можна записати:

$$\frac{l}{2} = \int_{t_0}^{t_0+T} K(t) dt = k \cdot T,$$

де  $l$  – довжина хвилі лазера;  $K(t)$  – коефіцієнт нахилу лінійної ділянки функції розгортки;  $k$  – інтегральний коефіцієнт нахилу лінійної ділянки функції розгортки, що дорівнює відношенню зміни оптичної довжини інтерферометра до часу, за який ця зміна відбулась.

У такому разі оптимальний робочий режим інтерферометра буде забезпечений при максимально можливій частоті сканування та амплітуді сканування п'єзокоректора в межах  $l$ . Це дає змогу отримати максимально можливий часовий період смуг, і таким чином досягнути максимально можливої точності вимірювань при заданій частоті дискретизації. Якщо амплітуда сканування інтерферометра буде більшою, то часовий період смуг зменшиться, що призведе до зниження точності вимірювань, а у разі зменшення амплітуди сканування може виникнути ситуація, коли в межах лінійної ділянки розгортки потраплятиме лише один імпульс.

З рис. 4 очевидно, що період смуг через часові інтервали визначається так:  
для напруги  $U_1$  (при  $t_0$ )

$$T = \frac{t_2 + t_3}{2} - \frac{t_1}{2} = \frac{l}{k(U_1)}$$

і для напруги  $U_2$  (при  $t_0''$ )

$$T'' = \frac{t_5 + t_6}{2} - \frac{t_4}{2} = \frac{l}{k(U_2)}$$

Якщо хід п'єзокоректора є нелінійним, тобто  $k$  залежить від часу чи товщини п'єзокоректора 5 (що знову ж призведе до його часової залежності), то повинна існувати кореляція між періодом слідування імпульсів та інтервалом часу  $t_0$  від початку робочого ходу розгортки до переднього фронту імпульсу.

Під час експериментальних досліджень було оцінено значення нелінійності ходу п'єзокоректора, що впливає на систематичну похибку інтерференційних вимірювань. Контрольною величиною був вибраний період інтерференційних смуг (інформаційних імпульсів), оскільки його величина повинна бути сталою і не залежати від положення інформаційних імпульсів, якщо оптична довжина ходу в інтерферометрі є сталою.

Під час експерименту визначався період смуг для різних значень  $t_0$ , амплітуди розгортки і її частоти. При тому був підібраний також оптимальний робочий режим п'єзокоректора (частота розгортки порядку 100 Гц та амплітуда  $\lambda$ ), при якому різниця періодів не перевищувала значення  $\Delta T \leq 10^{-4} T$ , що у разі фіксованої довжини хвилі лазера і сталої оптичної довжини інтерферометра означає, що і відносна похибка інтегрального коефіцієнта нахилу лінійної ділянки функції розгортки також є меншою, ніж  $10^{-4}$ . Оскільки це саме значення спостерігалось як при більших, так і при менших амплітудах розгортки, то потрібно вважати, що і коефіцієнт нахилу лінійної частини розгортки  $K(t)$  також є сталим у визначених межах.

### Висновки

Змодельовано та реалізовано практично функцію розгортки п'єзокоректора сканувального інтерферометра Фабрі-Перо з великою лінійною ділянкою та малим коефіцієнтом гармонік. Експериментально досліджена точність інтерференційних вимірювань з використанням оптимізованої функції розгортки. Результати досліджень свідчать, що з використанням запропонованої функції розгортки при оптимальних робочих режимах п'єзокоректора нелінійністю його ходу можна знехтувати.

Запропонована функція розгортки дає змогу використати сканувальний інтерферометр Фабрі-Перо для виконання прецизійних інтерференційних вимірювань різного призначення.

1 Скоков И.В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. 2. Petrovska G.A., Demkovych I.V., Bobitski Y.V. The measurement photothermal method of mirrors covering absorption coefficient // Proc. 7<sup>th</sup> International Conference on Optical Technologies, Optical Sensors and Measuring Techniques OPTO 2006. – Germany, 2006. – P. 147–152. 3. Ciroi S., Afanasiev V.L., Moiseev A.V., Botte V., Di Mille F., Dodonov S.N., Rafanelli P., Smirnova A.A. New photometric and spectroscopic observations of the Seyfert galaxy Mrk 315. – 2005. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS). – Vol. 360. – P. 253. 4. А. с. СССР 1468207. Цифровой фазометр / Г.А. Мартыневич (Петровская), Т.В. Марусин, П.А. Тищенко. – Заявл. 13.07.87, № 4281969 МКИ G 01 R 25/08.