

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СИГНАЛУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ХВИЛЬ

*І. З. Лютак*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42127*

*e-mail: ihor1t@gmail.com*

*Ультразвуковые пластинчатые волны приобретают широкое распространение среди методов ультразвукового контроля. В силу ряда их особенностей одной из основных есть большое расстояние распространения без значительного затухания амплитуды. В работе представлена математическая модель обработки ультразвукового сигнала пластинчатых волн, выполненная с помощью пакета математического программного обеспечения Simulink. Представленная модель дополнена математическим аппаратом вычисления погрешности обработки сигнала ультразвуковых пластинчатых волн, который базируется на подходе среднеквадратичного отклонения Алана.*

*Ultrasonic guided waves get wide distribution among the methods of ultrasonic control by virtue of row of their features. The most distinctive of its features is large distance of distribution without the considerable fading of amplitude. The mathematical model of the ultrasonic signal of guided waves processing, executed by the package of mathematical Simulink software, is presented in work. Presented model is complemented the mathematical formulations of calculation of error of the processing signal of ultrasonic guided waves which is based on approach of Allan variance.*

### Вступ

Пластинчасті ультразвукові хвилі є перспективним напрямком розвитку неруйнівного контролю металевих конструкцій, зокрема газопроводів, внаслідок таких їх особливостей, як можливість поширення на великі відстані, малий ступінь загасання амплітуди та велика інформативність отриманих результатів контролю. Проте їх відмінності від об'ємних ультразвукових хвиль, що традиційно використовуються в неруйнівному контролі, ставить нові вимоги щодо пристроїв вимірювання. Так для контролю напружено-деформованого стану металу, товщини стінки газопроводів необхідно високоточне визначення часу поширення як групи хвиль, так і однієї фази коливань.

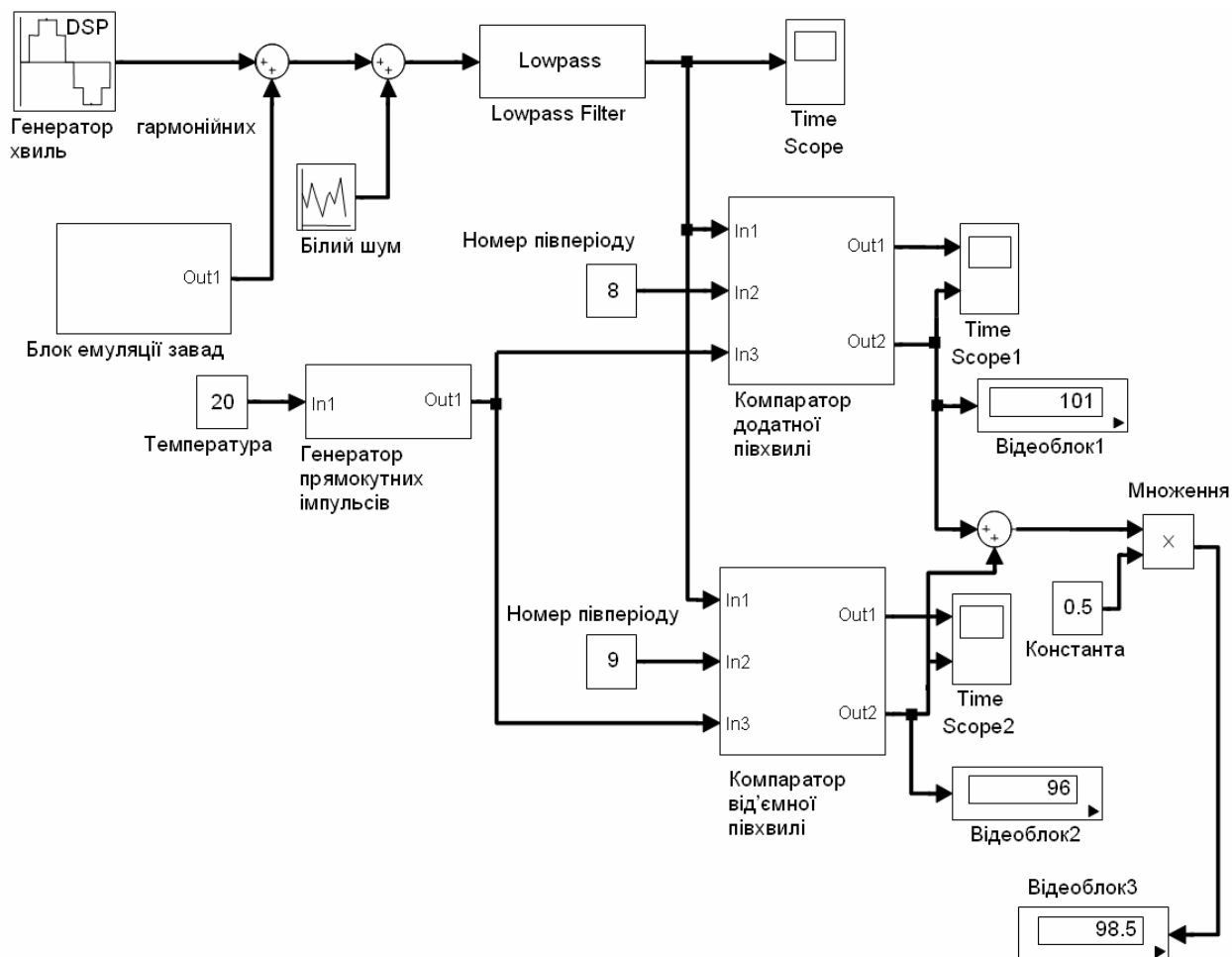
На даний час існує низка методів визначення часу поширення ультразвукової хвилі. У роботі [1] представлено пристрій та спосіб визначення швидкості ультразвукової об'ємної хвилі. Наведений спосіб полягає у визначенні часу шляхом обчислення кількості імпульсів високоточного кварцового генератора фіксованої частоти в часовому інтервалі між згенерованим та прийнятим ультразвуковими імпульсами. Проте наведений метод не можна адаптувати до визначення групової та фазової швидкості пластинчастих хвиль, оскільки в ньому не передбачено засобів до аналізу фази коливань та вибору пакету хвиль. Іншим методом визначення часу поширення хвилі є використання техніки інтерполяції результатів обчислення кількості імпульсів високоточного генератора. Перевагою запропонованого методу є можливість врахування частини імпульсу, що збільшує точність вимірювання сигналу до 10 пс. Недоліком методу є те, що в його основі лежить припущення про стабільну однакову частоту генератора. В реальних генераторах часто-

та імпульсів може змінюватись залежно від низки чинників, зокрема температури, що не дає змоги використовувати запропонований метод в умовах натурних вимірювань. Іншим методом вимірювання часу є визначення ряду однакових вимірювань та обробка результатів за допомогою статистичних методів [3]. Такий підхід дає багато переваг в точності визначення результатів, проте спосіб їх обробки відрізняється залежно від поставленої задачі та схеми вимірювання. Тому при розробці методу визначення часу поширення ультразвукових пластинчастих хвиль необхідно адаптувати спосіб статистичної обробки результатів.

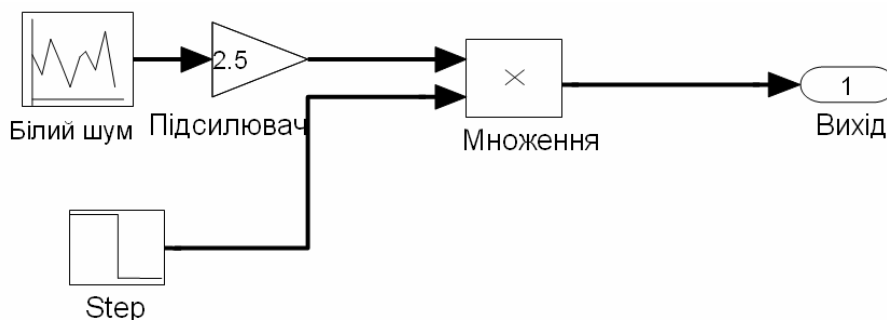
В результаті проведеного аналізу можна побачити, що для обробки сигналу ультразвукових пластинчастих хвиль необхідно розробити новий метод, за допомогою якого можна визначити час поширення як групи хвиль, так і однієї фази коливань. Для збільшення точності та достовірності вимірювання часу необхідно обробити отримані результати методами математичної статистики.

Модель вимірювання часу поширення пластинчастої ультразвукової хвилі

Для створення моделі визначення часу поширення пластинчастих ультразвукових хвиль визначимо їх основні параметри: частота згенерованих хвиль становить 100 кГц, діапазон частот, що генерується поряд із основною, знаходиться в межах  $\pm 12$  кГц, це відповідає параметрам найбільш поширених ультразвукових датчиків. Хвилі поширюватимуться в металі, з якого виготовляються магістральні газопроводи. Середовище поширення задає номінальні значення для фазової та групової швидкостей симетричних та асиметричних мод пластинчастих хвиль, що дають змогу приблизно оцінювати час вимірювання. Генератор високочастотних коливань працюватиме на частоті 20 МГц. Дані



**Рисунок 1 – Модель математичного пакету Simulink визначення часу проходження ультразвукової пластинчастої хвилі**



**Рисунок 2 – Блок Simulink емулявання завод першої гармоніки**

про номінальний час поширення та частоту генератора дають змогу вибрати розрядність лічильників, що у випадку створеної моделі має 16 біт.

Для більш реалістичного моделювання схеми вимірювання часу поширення ультразвуку до номінального значення генерованої частоти 100 кГц додано білий шум (рис. 1). Додатково при прийомі пакету ультразвукових коливань внаслідок низки деструктивних чинників: перехідні процеси на границях поділу середовищ поширення та протектора, чутливого елемента, момент інерції, втрати при трансформації механічної енергії в електричну тощо має

місце значне спотворення першої гармоніки. Це явище спостерігалось при лабораторних експериментальних дослідженнях. З метою моделювання вказаного явища було створено додатковий блок емуляції завод. Більш детально цей блок зображено на рис. 2. Тут протягом часу, що дорівнює першому періоду коливань, додаються заводи за допомогою блоку генерування білого шуму, які підсилюються у 2.5 рази. Як результат, ультразвуковий сигнал моделюється за допомогою трьох блоків: генератора гармонічних коливань з частотою 100 кГц, блоку білого шуму та блоку емуляції завод (рис. 3). Загальне рівняння сигналу  $f_c(t)$  буде таким:

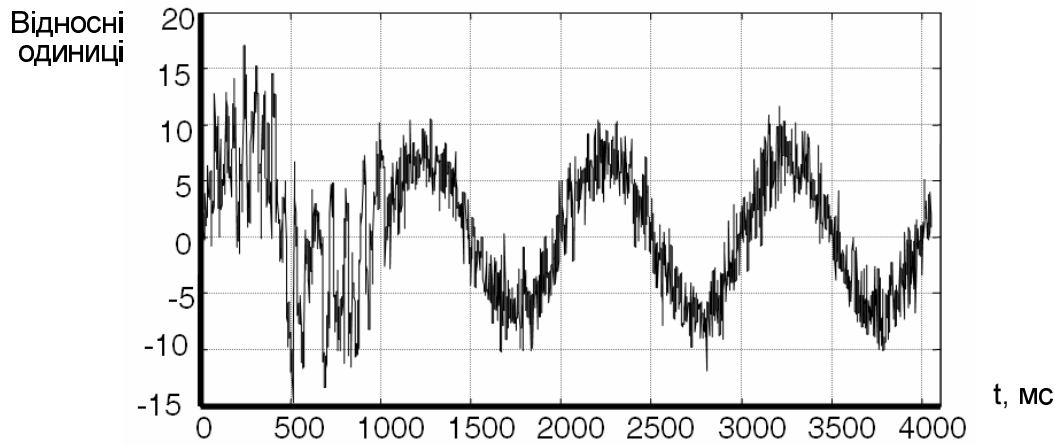


Рисунок 3 — Змодельований ультразвуковий сигнал

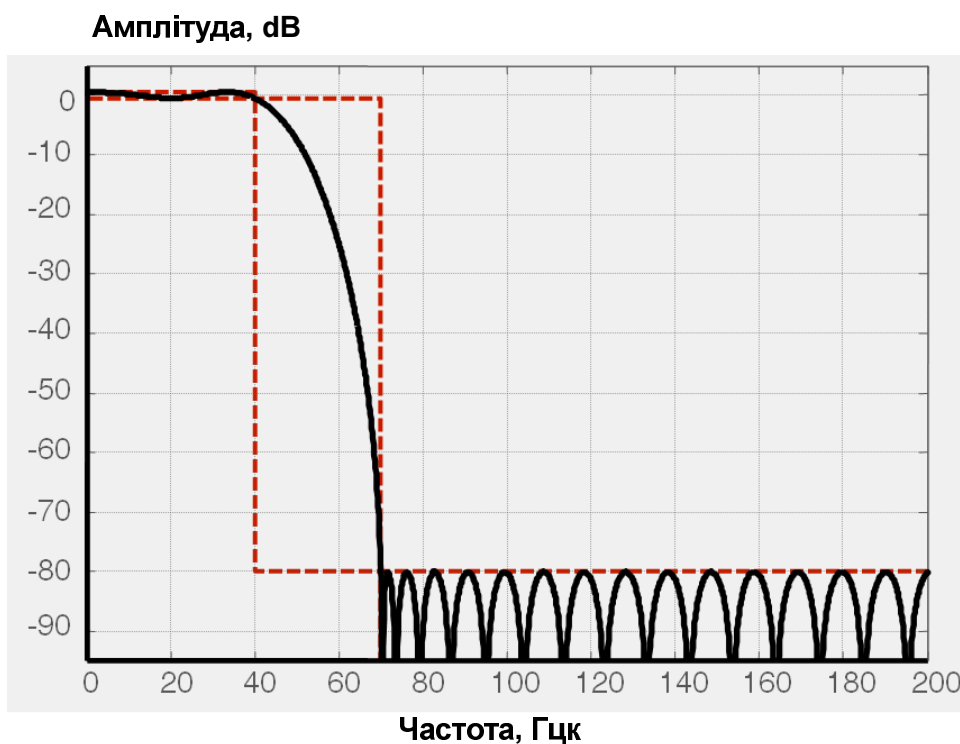


Рисунок 4 – Параметри фільтра ультразвукового сигналу

$$f_c(t) = A \sin(2\pi f_n t) + \Phi(t) + \Phi_{cn}(t), \quad (1)$$

де:  $t$  – час;  $A$  – амплітуда;  $f_n$  – номінальна частота;  $\Phi(t)$  – білий шум;

$$\Phi_{cn}(t) = \begin{cases} k\Phi(t), & 0 \leq t \leq T_c; \\ 0, & t > T \end{cases};$$

$k$  – коефіцієнт підсилення;  $T_c$  – період ультразвукового коливання.

Одержаний сигнал складно аналізувати через значну кількість завад в сигналі. Для зменшення завад використаємо фільтр нижніх частот, амплітудно-частотні характеристики якого зображені на рис. 4. Після проходження фільтру ультразвуковий сигнал матиме вигляд, що зображений на рис. 5.

У блоці компаратора сигнал порівнюється із пороговим значенням за яким посиляється

імпульс на лічильник. Лічильник імпульсів перезавантажується і починає рахувати кількість високочастотних сигналів від генератора прямокутних імпульсів. Другий лічильник рахує кількість півперіодів, що прийняті від початку вимірювання.

Сигнал, одержаний після фільтрування, (рис. 5), далі йде в блок компаратора, де відбувається визначення часу проходження півхвилі сигналу (рис. 6).

У разі співпадання числа півхвиль ультразвукового сигналу із заданим числом спрацює блок порівняння і обчислена кількість високочастотних прямокутних імпульсів поступає на вихід блоку. Для збільшення точності визначення періоду ультразвукового сигналу обробляється як додатна півхвиля так і від'ємна, це дає змогу врахувати деякі похибки вста-

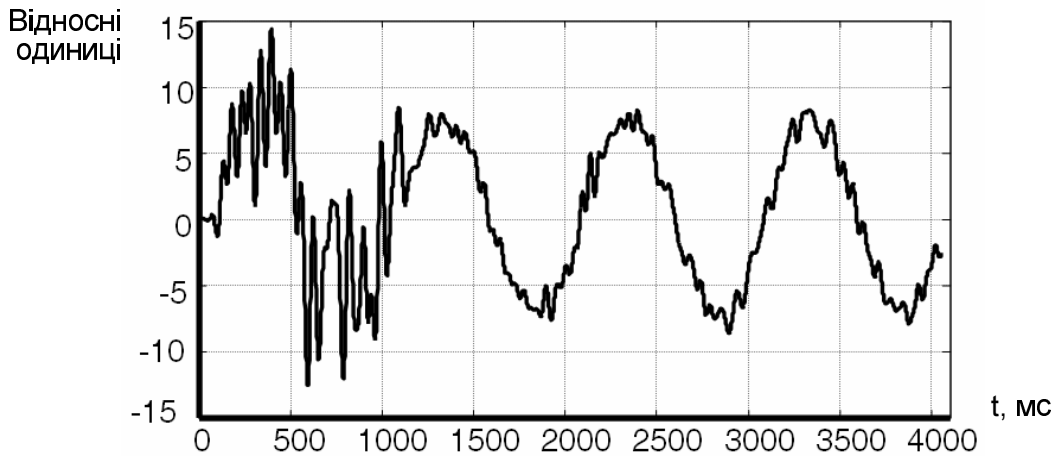


Рисунок 5 — Змодельований ультразвуковий сигнал на виході фільтру

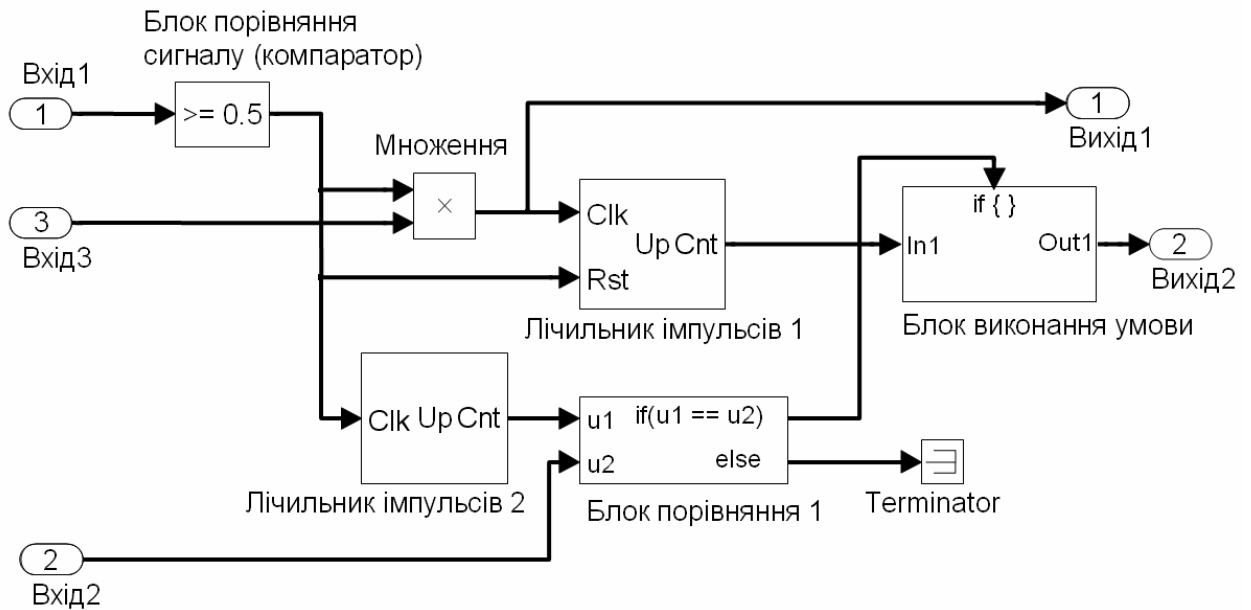


Рисунок 6 — Блок компаратора півхвилі ультразвукового сигналу

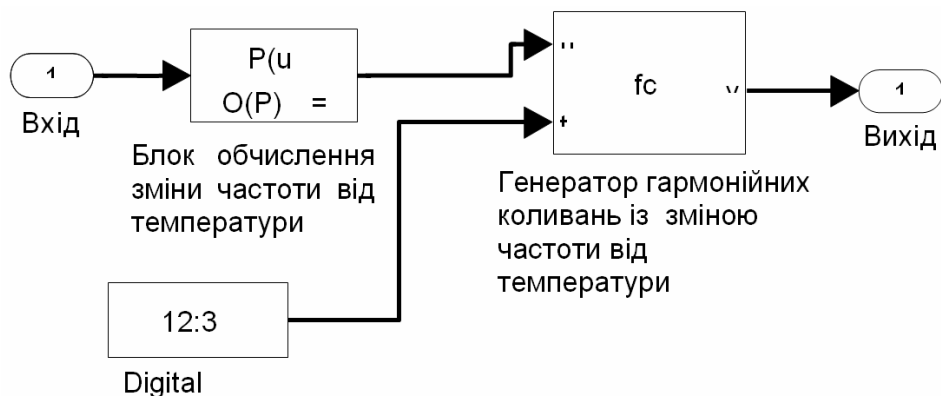
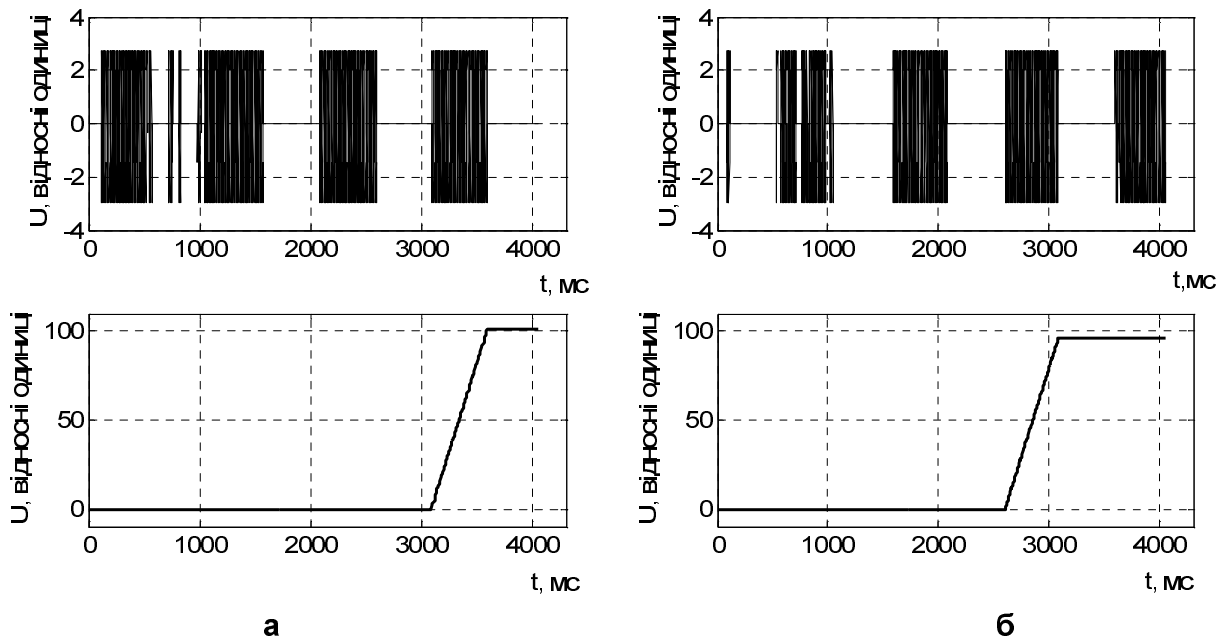


Рисунок 7 – Блок генератора височастотних прямокутних імпульсів

новлення рівня порівняння сигналу пов'язані із завадами. Так для обчислення тривалості модельованого ультразвукового сигналу додатна півхвиля складає 101 період височастотних коливань, а від'ємна півхвиля – 96 періодів. Для більш точного визначення періоду в схемі

передбачено сумування додатного та від'ємного півперіоду та поділу результату навпіл.

Для моделювання роботи височастотного генератора прямокутних імпульсів було створено схему в якій частота базового блоку змінюється залежно від температури (рис. 7).



*а – обробка додатної півхвилі; б – від’ємної півхвилі*

**Рисунок 8 – Результати роботи блока компаратора додатної та від’ємної півхвиль ультразвукового сигналу**

Зміна частоти від зовнішніх деструктивних чинників моделює реальну роботу високочастотного генератора, під час якої він може змінювати частоту протягом певного періоду часу, або стабільно працювати на одній частоті, яка не є номінальною. Оскільки деструктивних чинників, що впливають на роботу генератора, є багато, то неможливо розробити достатньо надійну схему компенсації їх впливу за допомогою схематичного рішення. Тому представлений блок дасть можливість оцінити ступінь впливу деструктивних чинників на точність всієї вимірювальної схеми та визначити методи обробки похибок. Зміна частоти  $\Delta$  від температури обчислюється так:

$$\Delta f_2(t) = 1.038 \cdot t + 0.041 \cdot t^2 + 3.55 \cdot 10^{-4} \cdot t^3. \quad (2)$$

Як результат визначення часу поширення ультразвукового модельованого сигналу одержано пакети високочастотних коливань, що заповнюють час вибраного півперіоду (рис. 8). Як видно із рисунка, завади можуть значно ускладнити точне визначення тривалості півперіоду. Для визначення похибки вимірюваного часу необхідно використати методи теорії статистики.

Оцінка похибки визначення частоти ультразвукового сигналу.

Оскільки зображена схема вимірювання часу поширення ультразвукового сигналу залежить від точності визначення кількості періодів коливань високочастотного генератора, найбільш оптимальним для оцінки похибки є відхилення Алана [4]. Даний підхід оцінки похибки був розроблений для атомних годинників і широко використовується в цій галузі на даний час. Згідно з теорією Алана відхилення ча-

стоти неперервного генератора сигналу, що усереднений за деякий час, буде таким:

$$\sigma_A^2(t_y) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} (\bar{U}_{k+1} - \bar{U}_k)^2, \quad (3)$$

де:  $\sigma_A^2$  – відхилення Алана;  $K$  – кількість повторних вимірювань сигналу за час  $t_y$ ;  $\bar{U}_k$  –  $k$ -й усереднений сигнал генератора.

Усереднений сигнал генератора можна визначити так:

$$\bar{U}_k = \frac{1}{t_y} \int_{kt_y}^{(k+1)t_y} U(t) dt, \quad (4)$$

де  $U(t)$  – сигнал генератора.

Більш простий спосіб обчислення (3)-(4) наведено в праці [5]:

$$\sigma_A^2(t_y) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) v(t) dt \right)^2, \quad (5)$$

де замість знаку нескінченності необхідно підставляти весь діапазон сигналу за одиничне

$$v(t) = \begin{cases} \frac{-1}{\sqrt{2}t_y}, & 0 < t < t_y \\ \frac{1}{\sqrt{2}t_y}, & t_y < t < 2t_y \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

функція.

Відхилення Алана дає змогу оцінювати вплив завад на досліджуваний сигнал, причому можна визначити режим роботи генератора, під час якого він генерує певний період часу одна-

кову частоту, яка відрізняється від номінальної, що важко зробити за допомогою обчислення загальнозвжованої нотації середньоквадратичного відхилення. Ще однією перевагою використання методу визначення відхилення за формулою Алана є те, що не потрібно вважати середнє значення білого шуму фази та відповідно частоти досліджуваного сигналу рівним одиниці.

Інший підхід визначення відхилення частоти від номінального значення використовує нотації модифікованого відхилення Алана [6]. Даний підхід, на відміну від традиційного підходу визначення відхилення Алана, дає змогу розрізнити завади, що спотворюють фазу коливань білого шуму та флуктуацій. Такий підхід є корисним для експрес оцінювання відхилення частоти генерованого сигналу:

$$\sigma_{AM}^2(t_y) = \frac{1}{K} \times \quad (7)$$

$$\times \sum_{k=1}^{K-1} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K-1} \left( \frac{1}{t_y} \int_{(i+k)t_0}^{(i+2k)t_0} U(t) dt - \frac{1}{t_y} \int_{it_0}^{(i+k)t_0} U(t) dt \right) \right)^2 \right)$$

де  $t_0$  – час одного періоду коливань сигналу генератора.

Отже, за допомогою (3)-(7) можна оцінити похибку обчислення генерування частоти. Особливістю їх є необхідність використання повторних вимірювань часу проходження одного півперіоду ультразвукового сигналу. З цією метою найбільш інтенсивно використовуються лічильники високочастотного сигналу, характеристики яких найбільш впливають на точність.

Внутрішній механізм оцінки лічильником відхилення обчислення частоти можна визначити із технічної документації [7]:

$$\sigma_{t_y} = \frac{1}{t_y} \sqrt{2(\delta t)_{mp}^2 + 2(\delta t)_{imm}^2}, \quad (8)$$

де:  $(\delta t)_{mp}$  – похибка встановлення часу від флуктуацій тригерів лічильника;  $(\delta t)_{imm}$  – похибка інтерполяції результатів визначення точок переходу високочастотного сигналу через нуль.

Як видно із (8) є два шляхи якими можна впливати на точність та роздільну здатність вимірювань частоти. Більш впливовим є флуктуації тригерів лічильника, що виникають внаслідок присутності шумів у входному сигналі. Цей шум заставляє входні схеми тригера спрацьовувати в момент часу, який відрізнятиметься від того моменту, якщо б шумів в сигналі не було. Оскільки шуми представляють собою випадковий процес, то похибка від флуктуації тригерів повинна обчислюватись як інші випадкові похибки. Загалом на похибку флуктуації впливають внутрішні шуми, які можна мінімізувати шляхом покращення заземлення виводів тригера та рівень наростання вихідної напруги транзисторів тригера, яка залежить від способу їх виготовлення і не може бути змінена:

$$\delta t_{mp} = \frac{\sqrt{III_B^2 + III_C^2}}{R_\phi}, \quad (9)$$

де:  $III_B$  – внутрішній шум тригера;  $III_C$  – шум входного сигналу;  $R_\phi$  – швидкість наростання вихідної напруги транзисторів тригера.

Представлені математичні залежності обробки високочастотного сигналу із поєднанням зі схемою проведення вимірювання, що складена засобами математичного пакету Simulink, дають повну інформацію про метод обробки ультразвукового сигналу пластинчастих хвиль. Даний метод має значні переваги в точності проведення вимірювань та простоті реалізації у вторинних пристроях контролю перед використанням методів перетворення аналогового сигналу у цифрову форму та подальшу їх обробку.

**Дана робота виконувалась за кошти гранту Президента України № GP/F13/0134.**

### Література

- 1 Пат. 50914 А, G 01 Н 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / І.З.Лютак. – № 2001021357, Заявл. 27.02.2001 Оpubл. 15.11.2002, Бюл. № 11.
- 2 Kalisz J. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution. Metrologia, vol. 41, pp. 17–32, 2004.
- 3 Stanford Research Systems, Inc., SR620 Universal Time Interval Counter Instruction Manual rev. 2.6, 2004.
- 4 Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards. Proc. IEEE, vol. 54, pp. 221–230, Feb. 1966.
- 5 Rubiola E. On the measurement of frequency and of its sample variance with high-resolution counters. Rev. Sci. Instrum., vol. 76, May 2004.
- 6 Snyder J.J. Algorithm for fast digital analysis of interference fringes, Appl. Opt. 19 (1980), no. 4, 1223–1225. 1.2
- 7 Stanford Research Systems, Inc., SR620 universal time interval counter instruction manual rev. 2.6, 2004. 2.4