

- 540–545. 14. Puertas A. M.; de las Nieves F. J. A New Method for Calculating Kinetic Constants Within the Rayleigh-Gans-Debye Approximation From Turbidity Measurements // *J. Phys. Condens. Matter*. 1997. 9. P. 3313–3320. 15. Eliçabe G.; Frontini G. Determination of the Particle Size Distribution of Latex Using a Combination of Elastic Light Scattering and TurbidimetrySA Simulation Study // *J. Colloid. Interface Sci.* 1996. 181. P. 669–672. 16. Kollenberg, R. G.; Veal, D. L. Optical Particle Monitors, Counters, and Spectrometers: Performance Characterization, Comparison, and Use // *J. IES*. 1992. 35. P. 64–81. 17. L. Vamos, P. Jani Simulation of LDA and LPA measuring techniques in the nanometer particle size range // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5948, 59481Q. 18. Huabei Jiang Enhanced Photon-Migration Methods for Particle Sizing in Concentrated Suspensions // *AIChE Journal* August. 1998. Vol. 44, No. 8. 19. Z. Sun, E. M. Sevick-Muraca Inversion Algorithms for Particle Sizing with Photon Migration Measurement // *AIChE Journal*. July 2001. Vol. 47, No. 7. P.1487–1498. 20. J. L. Castagner, A. R. Jones A Double Gaussian Beam Method for the Determination of Particle Size, Direction and Velocity // *Part. Part. Syst. Charact.* 2004. 21. P. 5 – 14. 21. T. Hubner, S. Will, A. Leipertz Determination of Particle Mass Density Distribution // *Part. Part. Syst. Charact.* 1999. 16. P. 85–91. 22. E. Astrakharchik-Farrimond, B. Y. Shekunov, N. B. E. Sawyer Particle Imaging Using a Transmission Wide-Field Phase Confocal Microscope // *Part. Part. Syst. Charact.* 2003. 20. P. 104 – 110. 23. E.F. Venger, A.V. Goncharenko, M.L. Dmitruk Optics of small particles and disperse media // *Naukova dumka*, Kyiv. 1999. 24. C. Y. Wang, S.-P. Pan, G.-S. Peng A comparison study on the measurement of nanoparticles // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5879 (SPIE, Bellingham, WA). 25. V. A. Bogatyrev, L. A. Dykman, B. N. Khlebtsov, A. V. Alekseyeva Gold nanoparticle sizing based on differential static light scattering spectroscopy, absorption spectroscopy, and dynamic light scattering // *Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 5475 (SPIE, Bellingham, WA). 26. V. Jacobsen, P. Stoller, C. Brunner, V. Vogel, V. Sandoghdar Interferometric optical detection and tracking of very small gold nanoparticles at a water-glass interface // *Optics express*. January 2006. Vol. 14, No. 1. P. 405–414. 27. P. Jam, A Nagy, A. Czitrovsky Nano-particle Size Distribution Measurement in Photon Correlation Experiments // *SPIE*. August 1999. Vol. 3749. 28. S. Sudo, Y. Miyasaka, K. Otsuka Quick and easy measurement of particle size of Brownian particles and plankton in water using a self-mixing laser // *Optics express*. February 2006. Vol. 14, No. 3. P. 1044–1055. 29. D. Buzatu, O. Annunziata, E. Petrescu, C. Popa, F. D. Buzatu Dynamic light scattering: a useful optical method to probe common-ion effects in protein-salt aqueous solutions // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. December 2005. Vol. 7, No. 6. P. 3161 – 3168. 30. R. H.Ottewill Experimental methods of particle characterization // *Pure&Appl. Chem*. 1992. Vol. 64, No. 11. P. 1697–1702. 31. K. Meigas Method for small particle detection by laser // *Opt. Eng.* September 1998. 37(9). P. 2587–2591.

УДК. 620.179

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

© Тихан Мирослав, 2007

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра приладів точної механіки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Пропонується спосіб вимірювання динамічного тиску, котрий дає змогу здійснювати вимірювання у реальному масштабі часу.

Предлагается способ измерения динамического давления, позволяющий осуществить измерение в реальном масштабе времени.

The method of dynamic pressure measurement which give a possibility measurement in real time has been proposed.

1. Вступ. Сучасні високотехнологічні галузі енергооблік, аерокосмічна промисловість, двигунобудування та інші, що можуть існувати і розвиватися техніки – теплоенергетика, енерготранспортування та

тільки при випереджувальному розвитку високоточних та швидкодійних систем автоматичного контролю і керування [1–4]. Однією з головних особливостей фізичних функціональних процесів у цих галузях є їхній динамічний характер. Тому для забезпечення швидкодії і точності систем автоматики вимірювальні процедури доводиться здійснювати у реальному (або максимально близькому до цього) масштабі часу. Своєю чергою, виконання вимірювання у реальному масштабі часу можливе при вирішенні однієї з таких проблем: швидкодійного коригування динамічної похибки або швидкодійного відновлення вхідного сигналу. Відомо [5], що ефективність усунення динамічної похибки методом коригування передовсім залежить від обсягу апріорної інформації про характер (“динамічність”) вимірюваного тиску, оскільки саме від цього залежить значення динамічної похибки. Але у згаданих сучасних системах, котрі потребують високоточного вимірювання динамічного тиску, обсяг такої інформації практично мінімальний, здебільшого відоме лише амплітудне значення тиску.

Проблема відновлення вхідного сигналу, як відомо, з математичного погляду належить до класу некоректно поставлених задач [6]. Їх розв’язують методом регуляризації (метод Тихонова) [7], однак практичне його застосування для вимірювання тієї чи іншої величини не дає бажаних результатів. Така ситуація, очевидно, зумовлена фізичними особливостями як самих величин, так і особливостями вимірювальних приладів, що застосовуються.

Загалом, відомі сьогодні методи корегування значення динамічної похибки [8] і спосіб відновлення вхідного сигналу із застосуванням методу регуляризації [6–7] вимагають значних витрат часу на опрацювання вихідного сигналу вимірювального перетворювача і до того ж невисокоточні. Такі обставини унеможливають застосування згаданих способів у високоточних вимірювальних системах, що працюють у реальному масштабі часу.

2. Описання способу. У цій роботі робиться спроба апаратного розв’язання проблеми відновлення вхідного сигналу, а саме пропонується спосіб вимірювання динамічного тиску, що здійснюється у реальному часі. Реалізація пропонованого способу дасть змогу підвищити швидкодію і точність відповідних систем автоматики.

Сьогодні вимірювання динамічного тиску здійснюють мехатронними вимірювальними перетворювачами

того чи іншого типу (тензорезистивними, п’єзоелектричними тощо). Такі перетворювачі, з погляду вимірювальної техніки – це лінійні системи, робота яких в динамічному режимі описується інтегралом згортки [9]

$$U(t) = \int_0^t g(t, \tau) \cdot p(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $g(t, \tau)$ – імпульсна перехідна характеристика; $U(t)$ – вихідний сигнал перетворювача; $p(t)$ – вимірюваний тиск (вхідний сигнал). Припускаємо, що $g(t, \tau) \neq 0$, $\ddot{g}_t(t, \tau)$ і $\ddot{U}(t)$ існують і неперервні.

Враховуючи конструктивні особливості різноманітних типів перетворювачів тиску, інтеграл згортки можна подати у більш явному вигляді

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t-\tau)) d\tau, \quad (2)$$

де β – коефіцієнт демпфування коливань первинного пружного перетворювача; η_0 – основна частота його власних коливань; k – статичний коефіцієнт перетворення.

У статичному режимі роботи перетворювача, за посередництвом його статичної характеристики, отримують значення вхідного сигналу. У разі динамічного тиску це означає необхідність отримання з рівняння (2) рівняння виду:

$$p(t) = F^{-1}(U(t)), \quad (3)$$

де F^{-1} – обернений до (2) оператор.

Для отримання рівняння типу (3) у явному вигляді двічі диференціюємо за часом залежність (2). Отже:

$$\begin{aligned} \dot{U}(t) &= k \cdot \int_0^t (-\beta) \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t-\tau)) d\tau + \\ &+ k \cdot \int_0^t \eta_0 \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta_0 \cdot (t-\tau)) d\tau = \\ &= -\beta \cdot U(t) + k \cdot \int_0^t \eta_0 \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \cos(\eta_0 \cdot (t-\tau)) d\tau; \end{aligned} \quad (4)$$

і

$$\begin{aligned} \ddot{U}(t) &= -\beta \cdot \dot{U}(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - k \cdot \int_0^t [\eta_0 \cdot \beta \cdot e^{-\beta(t-\tau)} \times \\ &\times p(\tau) \cos(\eta_0 \cdot (t-\tau)) + \eta_0^2 \cdot e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t-\tau))] d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

Ураховуючи (2) і (4) в (5), маємо

$$\ddot{U}(t) = -2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)$$

З останнього рівняння отримуємо

$$p(t) = \frac{\ddot{U}(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)}{k \cdot \eta_0} \quad (6)$$

Формула (6) є ключем до способу вимірювання динамічного тиску у реальному масштабі часу. Перед тим, як розтлумачити його суть, нагадаємо певні фізико-конструктивні особливості перетворювачів, що використовуються для вимірювання динамічного тиску.

Як зазначалось вище, у сучасних високотехнологічних галузях техніки вимірювання динамічного тиску здійснюють переважно тензорезистивними чи п'єзоелектричними вимірювальними перетворювачами, у яких вимірюваний тиск сприймається пружним елементом-мембраною і далі за тим чи іншим механоелектричним принципом перетворюється на електричний вихідний сигнал, пропорційний до деформації пружного елемента.

Отже, суть способу є такою:

1. За допомогою безпосереднього вимірювання тиску одержуємо значення вихідного сигналу перетворювача – $U(t)$, пропорційне до деформації первинного пружного елемента.

2. Одночасно тим чи іншим способом вимірюємо значення величини $\dot{U}(t)$, котра згідно з фізичною суттю більшості типів перетворювачів пропорційна до пришвидшення деформації первинного пружного елемента.

3. Числовим інтегруванням величини $\ddot{U}(t)$ отримуємо величину $\dot{U}(t)$, котра з фізичного погляду пропорційна до швидкості деформації первинного пружного елемента.

4. Знаючи конструктивні параметри η_0 , β , та k і використовуючи залежність (6), відновлюємо вхідний сигнал $p(t)$.

Оскільки вимірювання величин $U(t)$ і $\ddot{U}(t)$, а також обчислення величини $\dot{U}(t)$ відбувається практично одночасно, то можна стверджувати, що процедура вимірювання вхідного динамічного тиску $p(t)$ здійснюється у реальному масштабі часу із затримкою, зумовленою обчислювальною процедурою

$$\dot{U}(t) = \int_0^t \ddot{U}(\tau) d\tau.$$

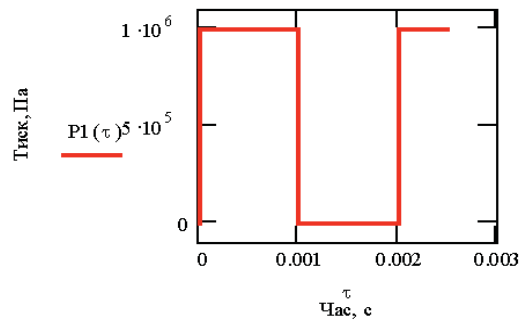
3. Теоретична апробація способу вимірювання на моделях тестових сигналів. Апробація розробленого способу полягає в тому, що, маючи точно визначений вхідний сигнал, за залежністю (2) отримуємо вихідний сигнал і далі, використовуючи залежність (6), одержуємо відновлений сигнал. Порівнянням відновленого сигналу і заданого вхідного встановлюємо дієвість пропонуваного способу.

Апробацію виконуємо на прямокутно-імпульсному і пілкоподібному тестових вхідних сигналах, оскільки саме ці сигнали найрізкіше змінні і за певної частоти викликають максимальні динамічні похибки.

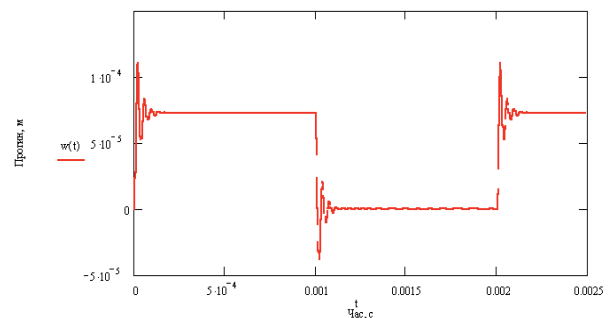
Взявши для прикладу тензорезистивний перетворювач тиску і задаючись відповідними фізико-конструктивними параметрами, апробацію здійснюємо числовим методом у системі MCD.

Прямокутно-імпульсний тестовий сигнал.

Нехай на вхід перетворювача подається тиск у вигляді прямокутних імпульсів (рис. 1, а).



а



б

Рис. 1. Вхідний прямокутно-імпульсний тестовий сигнал (а) та відповідний йому вихідний сигнал перетворювача (б)

Відповідно до залежності (2) вихідний сигнал становитиме

$$U(t) = k \cdot p_0 \cdot \left[\frac{\eta_0 - e^{-\beta t} \cdot [\eta_0 \cdot \cos(\eta_0 \cdot t) + \beta \cdot \sin(\eta_0 \cdot t)]}{\eta_0^2 + \beta^2} \right] \quad (7)$$

Графічне зображення такого сигналу показано на рис. 1, б.

З формули (7) подвійним диференціюванням отримуємо

$$\ddot{U}(t) = k \cdot p_0 \cdot \left[\frac{-\beta \cdot e^{-\beta t} \cdot (\eta_0 \cdot \cos(\eta_0 \cdot t) + \beta \cdot \sin(\eta_0 \cdot t))}{\eta_0^2 + \beta^2} + \frac{2\beta \cdot e^{-\beta t} \cdot (-\eta_0^2 \cdot \sin(\eta_0 \cdot t) + \beta \cdot \eta_0 \cdot \cos(\eta_0 \cdot t))}{\eta_0^2 + \beta^2} + \frac{e^{-\beta t} \cdot (\eta_0^3 \cdot \cos(\eta_0 \cdot t) - \beta \cdot \eta_0^2 \cdot \sin(\eta_0 \cdot t))}{\eta_0^2 + \beta^2} \right] \quad (8)$$

Для швидкості маємо

$$\dot{U}(t) = \int_0^t \ddot{U}(\tau) d\tau \quad (9)$$

Використовуючи залежність (6), одержимо відновлений сигнал (рис. 2).

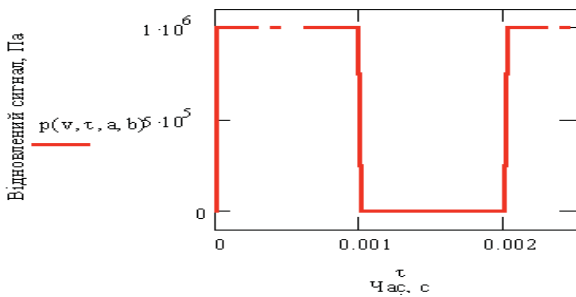


Рис. 2. Відновлений прямокутно-імпульсний тестовий сигнал

Відмінність між заданим тестовим сигналом і відновленим за запропонованим способом оцінимо деякою відносною похибкою

$$\delta(t) = \frac{p(t)_{\text{задане}} - p(t)_{\text{відновлене}}}{p(t)_{\text{задане}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

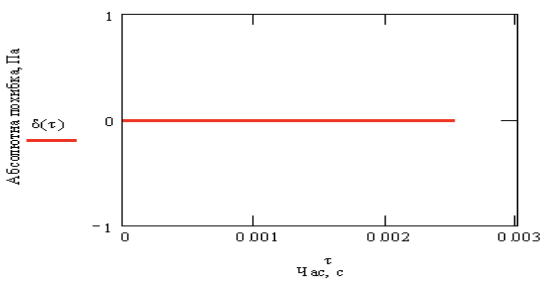
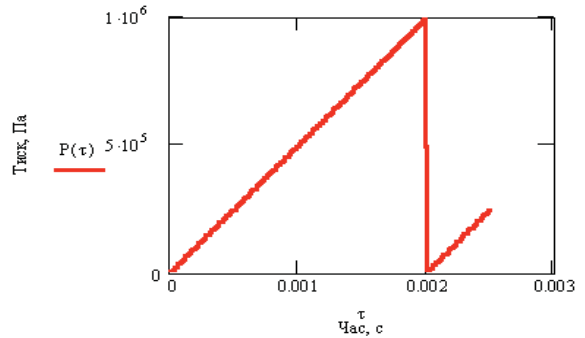


Рис. 3. Похибка відновлення прямокутно-імпульсного тестового сигналу

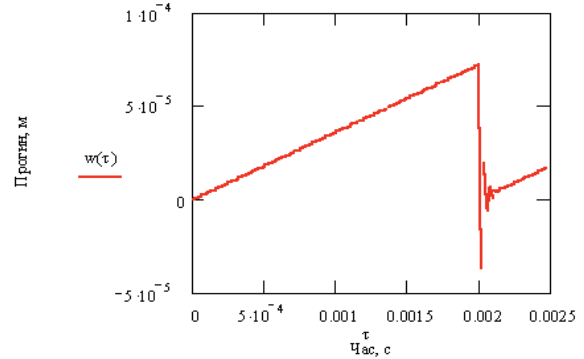
Ця відмінність показана на рис. 3.

Пилкоподібний тестовий сигнал.

Тепер припустимо, що вхідний сигнал має вигляд пилкоподібних імпульсів з амплітудою p_0 і певним періодом (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4. Вхідний пилкоподібний тестовий сигнал (а) та відповідний йому вихідний сигнал перетворювача (б)

Відповідно до залежності (2) вихідний сигнал перетворювача опишеться залежністю

$$U(t) = \frac{k \cdot p_0}{T} \cdot \left[\frac{t \cdot \eta_0 - e^{-\beta t} \cdot \sin(\eta_0 \cdot t)}{\eta_0^2 + \beta^2} \right] \quad (11)$$

Графічне зображення такого сигналу показано на рис. 4, б.

З формули (11) подвійним диференціюванням отримуємо

$$\ddot{U}(t) = \frac{k \cdot p_0}{T} \cdot \left[\frac{-\beta^2 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\eta_0 \cdot t) + 2\beta \cdot \eta_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\eta_0 \cdot t)}{\eta_0^2 + \beta^2} + \frac{\eta_0^2 \cdot \sin(\eta_0 \cdot t)}{\eta_0^2 + \beta^2} \right] \quad (12)$$

Для швидкості маємо

$$\dot{U}(t) = \int_0^t \ddot{U}(\tau) d\tau \quad (13)$$

Використовуючи залежність (6), одержуємо відновлений вхідний тестовий сигнал (рис. 5).

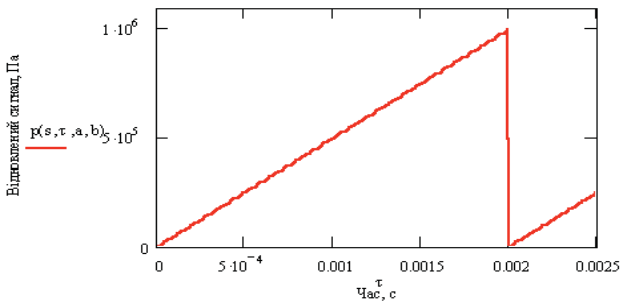


Рис. 5. Відновлений пилкоподібний вхідний тестовий сигнал

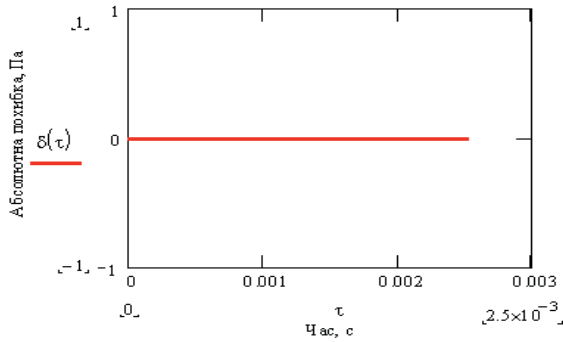


Рис. 6. Похибка відновлення пилкоподібного тестового сигналу

Відмінність між заданим тестовим сигналом і відновленим за запропонованим способом, розрахована за (10), показана на рис. 6.

З виконаної теоретичної апробації запропонованого способу на двох різкозмінних тестових сигналах можна зробити висновок про дієвість способу, оскільки похибка відновлення “найдинамічніших” вхідних сигналів не перевищує 0,001%.

4. Дослідження працездатності способу відновлення вхідного сигналу при дії дестабілізуювальних впливів. Нехай вимірюється тиск, який змінюється в часі за гармонічним законом (рис. 7).

$$p(t) = \frac{P_0}{2} (1 - \cos(\omega_0 \cdot t)) \quad (14)$$

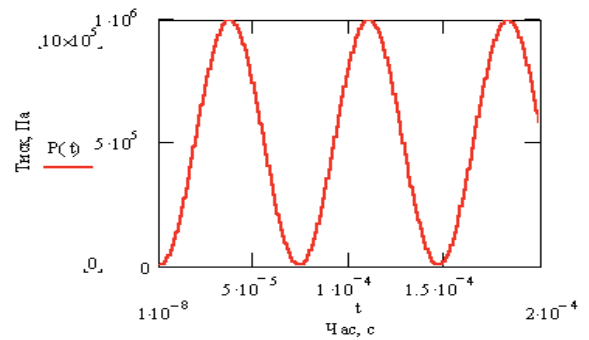
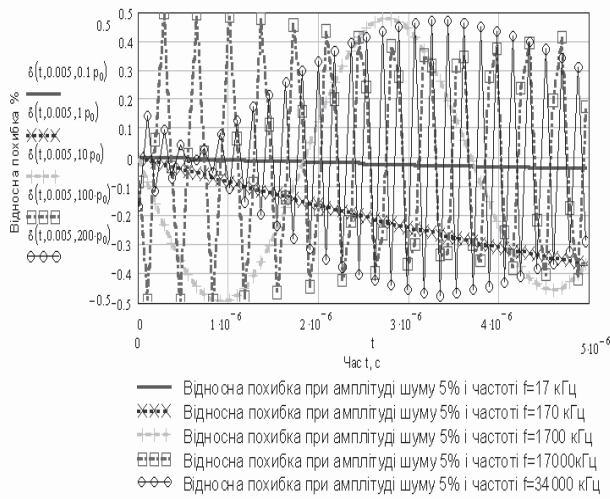
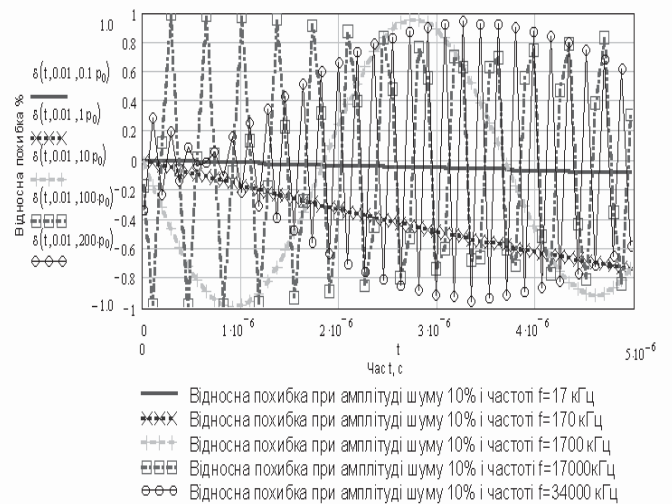


Рис. 7. Вхідний гармонічний сигнал



а



б

Рис. 8. Відносна похибка відновлення сигналу під час дії дестабілізуювального шуму амплітудою 5% від амплітуди вхідного сигналу (а) і 10% (б)

Дослідимо, як зміниться відновлений за запропонованим способом вхідний сигнал під час дії сторонніх дестабілізуючих впливів. Відхилення від істинного значення будемо оцінювати відносною похибкою.

Сторонні впливи подамо у вигляді шумів, що змінюються за законом:

$$Y(t) = Y_0 \cdot \cos(\nu \cdot t), \quad (15)$$

де Y_0 – амплітуда шуму, яка становить певний відсоток від амплітуди інформативного параметра.

Прийемо, що амплітуда шуму Y_0 може сягати 5 – 10% від амплітуди корисного сигналу, а частота шуму ν може змінюватись у діапазоні $0 \div 10^3 \eta_0$. Аналогічно до апробації способу задаємо відповідними фізико-конструктивними параметрами і, виконавши числове моделювання у системі MCD, отримуємо значення відносної похибки, яка спричинена дією дестабілізуючого шуму і розрахована за (10). Графічно отримані результати подано на рис. 8, а, б.

Як видно з досліджень, відносна похибка відновлення сигналу за різних частот дестабілізуючого фактора не перевищує амплітудного значення шуму. Отже, можна зробити висновок, що запропонований спосіб є дієвим і стійким до дії дестабілізуючих факторів у вигляді низько- та високочастотних шумів.

1. Маркелов И.Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики //

Sensors & Systems, 2000. – № 11 – 12. – С. 24 – 25.

2. Мокров Е.А., Белозубов Е.М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Датчики и системы. – 2005. – № 6. – С. 10–14. 3. Контев Ю.Н., Горюхи А.В. Датчиковая аппаратура для ракетно-космической техники // Радиотехника». Космическое приборостроение. – 1995. – № 10. – С. 5 – 6. 4. Осадчий Е.П. К вопросу создания средств переработки информации для современных производственных комплексов // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 13. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. – С. 3 – 7. 5. Тихан М. Датчики переменного давления для систем управления с нестационарными термовлияниями. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пенза, 1995. 6. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. – М.: Сов. радио, 1979. – 272. 7. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 8. Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с. 9. Азизов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей. – А.: Энергия. 1975. – 256 с.