

УДК 621.317

О. М. Васілевський, д.т.н., проф.

СПОСІБ АПРІОРНОЇ ОЦІНКИ НЕПЕВНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАННЯХ

Вінницький національний технічний університет, o.vasilevskyi@gmail.com

Запропоновано спосіб оцінки динамічної невизначеності вимірювальних приладів на основі математичної моделі частотної характеристики вимірювального приладу та моделі спектральної функції вхідного сигналу. Отримано модельне рівняння для оцінки амплітудного значення динамічної невизначеності вимірювань, яке зумовлено обмеженими властивостями вимірювальних пристроїв, коли вимірювальний сигнал проходить через нього в динамічних режимах роботи. Математичне моделювання характеристики зміни динамічної невизначеності при проходженні вимірювального сигналу через вимірювальний перетворювач здійснюється на прикладі динамічної моделі вібраційного перетворювача.

Вступ та постановка проблеми

Під час складання звіту про результати динамічних вимірювань необхідно продемонструвати кількісні значення якості вимірювань так, щоб їх надійність була правильно оцінена [1-14]. Без таких значень результати динамічних вимірювань не можна порівнювати ні один з одним, ні з контрольними значеннями. Тому необхідно мати спосіб оцінки характеристик якості динамічних вимірювань. У цьому випадку необхідно враховувати той факт, що під час динамічних вимірювань на певному етапі буде присутній перехідний режим роботи вимірювальних приладів (ВП), протягом якого сигнал на виході вимірювального пристрою суттєво змінюється через деякий час. Ці обставини обумовлені інерційними властивостями ВП, оскільки вони, як правило, складаються з безлічі різних мас та пружин, ємностей і індуктивності, а також інших інерційних елементів, що призводять до прояву динамічної невизначеності. Рівняння перетворення ВП, що відображає його статичні властивості, неприйнятно в динамічному режимі. У цьому випадку ми повинні звернутися до диференціальних рівнянь, що описують динамічні співвідношення між вихідним $y(t)$ та вхідних $x(t)$ параметрами вимірювальних пристроїв [15 - 21].

З огляду на вищенаведене, існує необхідність розробки способу оцінки невизначеності динамічних вимірювань, які відповідають вимогам міжнародних стандартів в частині оцінювання характеристик якості вимірювань, що є актуальним науковим завданням у галузі метрології.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Якщо рівняння перетворення засобу вимірювання, що працює в динамічному режимі можна представити у вигляді

$$Y = K_c X, \quad (1)$$

де X – значення фізичної величини, що вимірюється (вхідний сигнал); K_c – коефіцієнт перетворення засобу вимірювальної техніки (ЗВТ); Y – результат вимірювання (вихідний сигнал) [2, 20].

Тоді математичне очікування вхідного сигналу буде дорівнювати $M[X]$, а математичне очікування вихідного сигналу буде дорівнювати

$$M[Y] = K_c M[X], \quad (2)$$

де $M[Y]$ і $M[X]$ – відповідно математичні очікування вихідного і вхідного сигналів ЗВТ [2, 20].

Спектральна щільність вхідного сигналу $X(t)$ має вигляд [2, 20]

$$H_X(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} (2T)^{-1} |X(j\omega)|^2 \quad (3)$$

де $X(j\omega)$ – зображення Фур'є, що отримується шляхом заміни в операторному зображенні сигналу $X(s)$ оператора s на $j\omega$; T – час спостереження; $\omega = 2\pi f$.

Вираз для спектральної щільності вихідного сигналу може бути представлений таким чином

$$H_Y(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} (2T)^{-1} |Y(j\omega)|^2 \quad (4)$$

Відношення зображень вихідної і вхідної величин утворює вираз для передатної функції ЗВТ

$$K_c(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{k=0}^m B_k s^k}{\sum_{q=0}^n A_q s^q}, \quad (5)$$

де $Y(s)$, $X(s)$ – операторні зображення вихідного $Y(t)$ і вхідного $X(t)$ сигналів, відповідно; k , q – порядок похідних від Y і X , відповідно; A_q , B_k – коефіцієнти диференційного рівняння [20].

Таким чином можна записати, що [2, 20]

$$H_Y(\omega) = |K_C(j\omega)|^2 H_X(\omega), \quad (6)$$

де $K_C(j\omega)$ – частотна характеристика ЗВТ [19, 20].

Спектральна щільність сигналу похибки, приведенної до входу, буде дорівнювати

$$H_{\Delta X}(\omega) = \left| \frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1 \right|^2 H_X(\omega), \quad (7)$$

де K_C - частотна характеристика вимірювального приладу при $\omega = 0$.

Дисперсія вихідного сигналу σ_Y^2 при динамічних вимірюваннях може бути визначена як квадратний корінь з інтеграла від спектральної щільності вихідного сигналу за всіма частотами

$$\sigma_Y = \pi^{-1/2} \left(\int_0^{\infty} H_Y(\omega) d\omega \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Враховуючи рівняння (3) та (6), дисперсія вихідного сигналу σ_Y^2 (8) може бути представлена на основі спектральної щільності вхідного сигналу та частотної характеристики використовуваного вимірювального каналу (вимірювального засобу)

$$\sigma_Y = \pi^{-1/2} \left(T^{-1} \int_0^{\infty} |K_C(j\omega)|^2 |X(j\omega)|^2 d\omega \right)^{1/2}, \quad (9)$$

де $|K_C(j\omega)|$ - модуль частотної характеристики вимірювального пристрою, що використовується для динамічних вимірювань [20].

Аналогічно, дисперсія похибки, приведена до входу, буде дорівнювати

$$\sigma_{\Delta X} = \pi^{-1/2} \left(\int_0^{\infty} \left| \frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1 \right|^2 |X(j\omega)|^2 d\omega \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Модуль частотної характеристики вимірювального пристрою визначається за формулою

$$|K_C(j\omega)| = (a^2(\omega) + b^2(\omega))^{1/2}, \quad (11)$$

де $a(\omega)$, $b(\omega)$ - відповідно, дійсна та уявна частини частотної характеристики ВП $K_C(j\omega)$ [10, 19].

Спектральна функція вхідного сигналу $X(j\omega)$ пов'язана зі своєю часовою функцією $X(t)$ виразом Лапласа [2, 17, 20]

$$X(s) = \int_0^{\infty} X(t) e^{-st} dt. \quad (12)$$

Модельне рівняння для оцінювання динамічної невизначеності вимірювального приладу

Динамічна похибка вимірювального перетворювача, приведена до входу, в часовій області може бути представлена виразом

$$\Delta X(t) = \pi^{-1/2} \int_0^{\infty} \sigma_{\Delta X} e^{j\omega t} d\omega = \pi^{-1/2} \left[\int_0^{\infty} \sigma_{\Delta X} \cos(\omega t) d\omega + j \int_0^{\infty} \sigma_{\Delta X} \sin(\omega t) d\omega \right]. \quad (13)$$

Динамічна похибка, що вноситься через обмежені властивості ВП, який використовується для динамічних вимірювань, може бути оцінена в часовій області на основі модельного рівняння спектральної функції вхідного сигналу і частотної характеристики ЗВТ. Оскільки вираз (13) складається з дійсної та уявної частин, а при оцінці похибки нас цікавить її амплітудне значення, то вираз (13) можна записати у вигляді

$$|\Delta X(t)| = \left[\left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \cos(\omega t) d\omega \right)^2 + \left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \sin(\omega t) d\omega \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

де $F_s = 1/T_s$ – частота дискретизації.

Згідно GUM Supplement 2 [3, 4] непевність, пов'язана з оцінкою похибки, визначається як дисперсія при рівномірному розподілі ймовірності, тобто динамічну непевність вимірювального пристрою можна оцінити за формулою

$$u_D(t) = \sqrt{\left(\int_0^{\pi/2} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \cos(\omega t) d\omega \right)^2 + \left(\int_0^{\pi/2} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \sin(\omega t) d\omega \right)^2} / \sqrt{3}. \quad (15)$$

Апробація способу апріорної оцінки динамічної непевності на прикладі віброперетворювача

Для апробації запропонованої моделі оцінки динамічної невизначеності вимірювальних приладів проведемо дослідження характеристик зміни динамічної невизначеності на прикладі вимірювання вібраційного прискорення з використанням акселерометра.

Диференціальне рівняння, що описує динамічний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами вимірювального перетворювача вібраційного прискорення має вигляд [17, 20, 21]

$$\frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + 2h \frac{dX_s(t)}{dt} + h_k^2 X_s(t) = \frac{F_0}{m} \sin(\omega_0 t), \quad (16)$$

де $F(t) = F_0 \sin(\omega_0 t)$ - гармонічна вимушена сила коливань поверховості об'єкту (вхідна величина); F_0 - амплітуда сили; ω_0 - кутова частота вимушеної сили; $X_s(t)$ - механічні коливання інерційної маси; m - маса акселерометра; c - параметр демпфування; k - еквівалентна жорсткість п'єзоелементів, $h = c/2m$ - коефіцієнт демпфування; $h_k = \sqrt{k/m}$ - критичне значення коефіцієнту демпфування [20, 21].

Бюджет непевності складових елементів вимірювального каналу віброприскорення у відносних одиницях наведено в таблиці 1 [20, 22]. На підставі експериментального дослідження бюджету непевності вимірювального каналу віброприскорення (табл. 1) відносно значення комбінованої стандартної непевності без урахування динамічної складової непевності становить 0,36 % [21, 32].

Акселерометр розташований на електрошпинделі двигуна та виконує точкове вимірювання вібрації в діапазоні частот від 6 кГц до 10 кГц, яка створюється за рахунок роботи підшипника кочення. Вібрації, що породжуються іншими збуджуючими силами, повинні розглядатися як завади [15, 20, 32].

Передатна функція даного засобу вимірювання буде мати вигляд

$$H(s) = \frac{K_{MM}}{s^2 + 2hs + h_k^2}, \quad (17)$$

де K_{MM} - коефіцієнт пропорційності вимірювального каналу віброприскорення.

Перейшовши до частотної області та відокремивши дійсну та уявну частини, отримаємо вираз модуля частотної характеристики засобу вимірювання віброприскорення

$$|K_C(j\omega)| = \left| \frac{K_{MM}}{(j\omega)^2 + 2h(j\omega) + h_k^2} \right| = \left[\frac{K_{MM}}{\omega^4 - 2\omega^2 h_k^2 + 4\omega^2 h^2 + h_k^4} \right]^{1/2}, \quad (18)$$

$$K_C = \frac{mK_{MM}}{k}. \quad (19)$$

Таблиця 1. Бюджет непевності складових елементів каналу віброприскорення

Elements	Value of relative uncertainty, %	The expanded uncertainty (coverage factor 1.96 at confidence level 95%), %	Distribution
Accelerometer	0.3	0.59	Uniform (rectangular)
Preliminary charge amplifier	0.02	0.04	Uniform (rectangular)
Bandpass filter	0.2	0.39	Uniform (rectangular)
Scale converter	0.01	0.02	Uniform (rectangular)
ADC	0.005	0.01	Uniform (rectangular)
Background noise	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$4.19 \cdot 10^{-6}$	Normal
The combined standard uncertainty (\tilde{u}_c)	0.36	0.71	Normal
Mean value			2.93 m/s ²

Вхідний сигнал $F_0 m^{-1} \sin(\omega_0 t)$ віброприскорення має зображення

$$X(j\omega) = \omega_0 F_0 (\omega_0^2 + (j\omega)^2)^{-1} m^{-1}, \quad (20)$$

де ω_0 – циклічна частота вхідного сигналу віброприскорення, яка змінюється в діапазоні від 6 до 10 кГц, тобто її мінімальне значення складає 18849,5 рад/с, а максимальне значення складає 31415,9 рад/с.

Модуль зображення вхідного сигналу віброприскорення описується виразом

$$|X(j\omega)| = \omega_0 F_0 (\omega_0^2 - \omega^2)^{-1} m^{-1}. \quad (21)$$

З літературних джерел [23 – 32], відомо, що амплітуда вимушеної гармонічної сили F_0 складає $3 \cdot 10^{-4}$ м. Маса акселерометра $m = 4 \cdot 10^{-2}$ кг. Параметр демпфування c для п'єзоелектричних акселерометрів дорівнює 0,5, еквівалентна жорсткість п'єзоелементів складає $k=2$, мінімальний час спостереження $T = 300$ с. Коефіцієнт пропорційності (підсилення) K_{MM} вимірювального каналу віброприскорення дорівнює 10^5 .

Підставивши знайдені значення модуля частотної характеристики (18), (19) та зображення вхідного сигналу (21) у рівняння (10) отримаємо вираз для оцінки дисперсії похибки, приведеної до входу в спектральній області

$$\sigma_{\Delta X} = \pi^{-1/2} \left(\int_0^{\infty} \frac{\omega F_0 \left[\left(k(h_k^2 - \omega^2) - m(h_k^2 - \omega^2)^2 - 4m\omega^2 h^2 \right)^2 + 4k^2 \omega^2 h^2 \right]}{2Tm(\omega_0^2 - \omega^2) \left(m(h_k^2 - \omega^2)^2 + 4m\omega^2 h^2 \right)^2} d\omega \right)^{1/2}. \quad (22)$$

Щоб представити характеристику зміни динамічної непевності ВП віброприскорення в часовій області, що обумовлена інерційними властивостями ВП при динамічному режимі роботи, необхідно виконати зворотнє перетворення Фур'є, що описується виразом (15). Оскільки вираз (15) складається з дійсної та уявної частин, а нас цікавить саме амплітудне значення динамічної непевності, то вираз для оцінки динамічної непевності (15) з урахуванням виразу (22) можна записати у вигляді

$$u_D(t) = \left[\left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \cos(\omega t) d\omega \right)^2 + \left(\int_0^{\pi F_s} \pi^{-1/2} \sigma_{\Delta X} \sin(\omega t) d\omega \right)^2 \right]^{0.5} / \sqrt{3}. \quad (23)$$

Для розв'язку рівняння (23) з урахуванням рівняння (22) було використано математичний пакет Maple 12. Підставивши у вирази (22) і (23) значення впливних коефіцієнтів наведених вище отримано амплітудне значення динамічної непевності вимірювання віброприскорення, що складає 0,068 м/с² (рис. 1) при частоті вхідного сигналу віброприскорення 10 кГц і часі спостереження віброприскорення $T=300$ с. Якщо час спостереження збільшити до 600 с на тій же частоті вхідного сигналу віброприскорення, то значення динамічної непевності зменшується до 0,049 м/с² (рис. 2).

На мінімальній частоті вхідного сигналу віброприскорення 6 кГц, при часі спостереження 300 с, значення динамічної непевності складає 0,182 м/с² (рис. 3). Якщо час спостереження збільшити до 600 с на частоті вхідного сигналу віброприскорення 6 кГц, то значення динамічної непевності зменшується до 0,13 м/с² (рис. 4) (номінальне значення сигналу віброприскорення підшипників кочення електрошпинделя двигуна складає 2,93 м/с² [20, 32]). Характеристики зміни динамічної невизначеності вимірювання віброприскорення в залежності від часу, що отримані за допомогою математичного пакету Maple 12 представлені на рисунках 1-4 при мініальному та максимальному значеннях частоти вхідного сигналу віброприскорення (6 кГц та 10 кГц) з часом спостереження 300 с та 600 с, відповідно.

Таким чином, на основі запропонованого способу оцінки динамічної непевності було виконано розрахунок максимального значення динамічної непевності на прикладі модельного рівняння віброперетворювача. Оцінку здійснено на основі математичних моделей спектральної функції вхідного сигналу вібраційного прискорення і частотної характеристики віброперетворювача. Це дозволяє додатково до значень статичних стандартних непевностей, що наводяться в табл. 1, враховувати значення динамічної непевності, що виникає при динамічних режимах роботи ВП, при розрахунку комбінованої непевності вимірювання. Для розрахунку максимального відносного значення динамічної непевності вимірювання віброприскорення, поділимо отримане максимальне значення динамічної непевності 0,182 м/с² (рис. 3) на номінальне значення віброприскорення $\bar{X} = 2,93$ м/с² [22, 30, 32], в результаті чого отримуємо

$$\tilde{u}_D = \frac{u_D(t)}{\bar{X}} 100\% = \frac{0.182}{2.93} 100\% = 6.21\%. \quad (24)$$

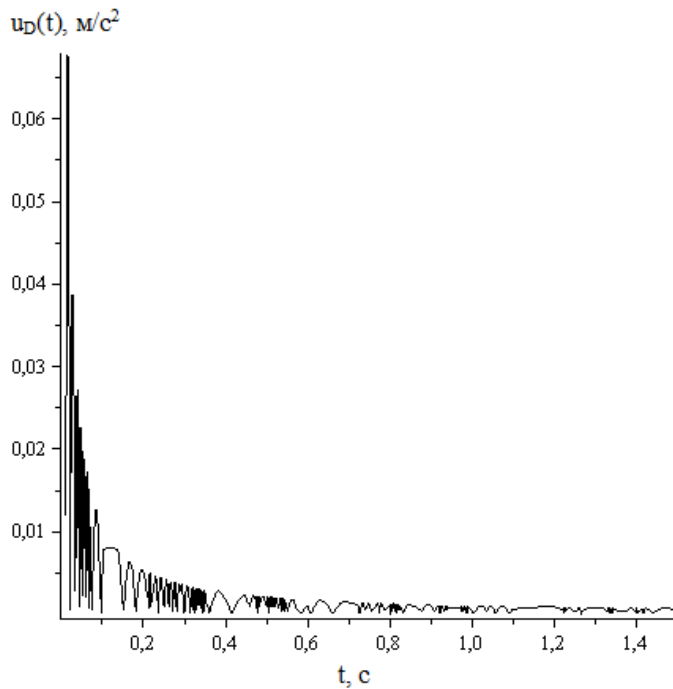


Рисунок 1. Характеристика зміни динамічної непевності ВП віброприскорення при частоті 10 кГц і часі спостереження 300 с

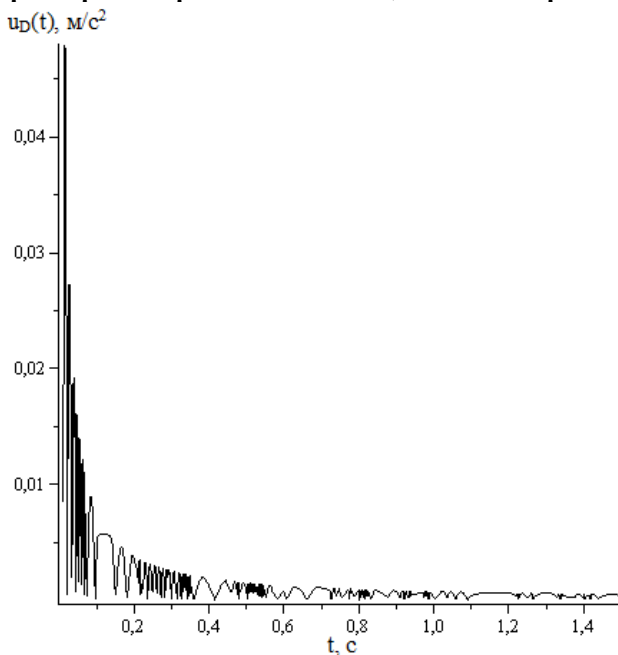


Рисунок 2. Характеристика зміни динамічної непевності ВП віброприскорення при частоті 10 кГц і часі спостереження 600 с

Таблиця 2. Бюджет динамічної непевності ВП віброприскорення

Quantity	Mean value, m/s ²	Frequency of the study, kHz	Observation time, s	Value of dynamic uncertainty, m/s ²	The expanded dynamic uncertainty (coverage factor 1.96 at confidence level 95%), m/s ²	Value of relative dynamic uncertainty, %
Віброприскорення	2.93	6	300	0.182	0.36	6.21
		6	600	0.13	0.25	4.44
		10	300	0.068	0.13	2.32
		10	600	0.049	0.1	1.67

При обчисленні відносного значення динамічної непевності вимірювання віброприскорення за формулою (23) і (24) для частоти 6 кГц і часу спостереження 600 с отримаємо 4,44% (рис. 4). На частоті 10 кГц і при часі спостереження 300 с (рис. 1) ми отримуємо відносну динамічну непевність вимірювання 2,32%. На частоті 10 кГц і при часі спостереження 600 с (рис. 2) отримуємо відносну динамічну непевність вимірювання 1,67%.

Бюджет динамічної непевності вимірювання віброприскорення для часу спостереження 300 с і 600 с на частотах 6 і 10 кГц наведено в таблиці 2. Максимальне значення динамічної непевності становить 6,21% при частоті 6 кГц і часі спостереження 300 с (табл. 2).

Значення відносної комбінованої непевності вимірювання віброприскорення з урахуванням значень відносної статичної комбінованої непевності \tilde{u}_c (табл. 1) і відносної динамічної непевності \tilde{u}_D (табл. 2) розраховуємо за формулою

$$\tilde{u}_c = \sqrt{\tilde{u}_D^2 + \tilde{u}_c^2} = \sqrt{6.21^2 + 0.36^2} = 6.22\% \quad (25)$$

Таким чином, максимальне значення відносної комбінованої непевності вимірювання віброприскорення становить 6,22% при часі спостереження 300 с та частоті 6 кГц. При часі спостереження 600 с на частоті 6 кГц комбінована непевність становить 4,45%. На частоті 10 кГц при часі спостереження 300 с, комбінована непевність становить 2,35%, а при часі спостереження 600 с на тій же частоті - 1,71%.

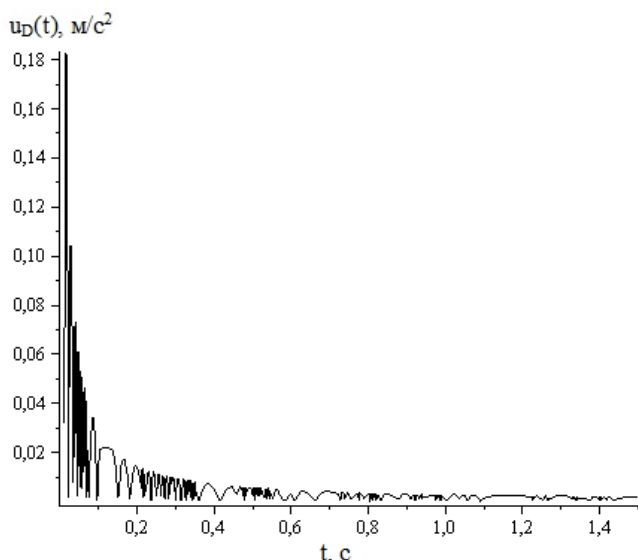


Рисунок 3. Характеристика зміни динамічної непевності ВП віброприскорення при частоті 6 кГц і часі спостереження 300 с

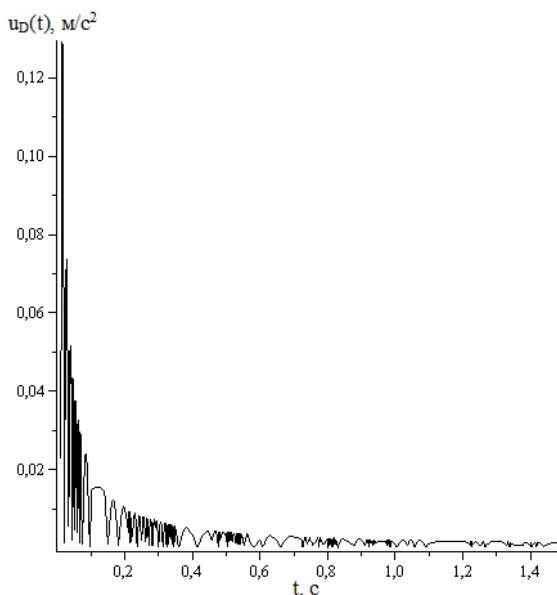


Рисунок 4. Характеристика зміни динамічної непевності ВП віброприскорення при частоті 6 кГц і часі спостереження 600 с

Висновки

Запропонований спосіб апріорної оцінки динамічної непевності вимірювань дозволяє розрахувати амплітудні значення динамічної непевності та враховувати її під час розрахунку комбінованої непевності результатів вимірювань. Це дає змогу подавати і порівнювати результати динамічних вимірювань, що виконуються різними засобами, в різний час, в будь-яких лабораторіях провідних країн світу з урахуванням міжнародних вимог до оцінки якості вимірювань - концепції непевності. Даний спосіб апробовано при оцінці динамічної непевності вимірювання віброприскорення на основі частотної характеристики ВП і моделі спектральної функції вхідного сигналу у вигляді синусоїди, чим підтверджено його адекватність та ефективність.

Запропонований підхід до оцінки динамічної непевності засобів вимірювання може бути використаний для будь-яких вимірювальних засобів, що характеризуються динамічними компонентами будь-якого типу.

Список літературних джерел

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO, 2009. – 32 p.
2. Васілевський О. Оцінка непевності динамічних вимірювань, що моделюються лінійною часовою інваріантною системою // III Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Петра Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи». – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. - С. 152-153.
3. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML "Evaluation of Measurement Data – Supplement 2 to the 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' – Extension to any number of output quantities", Joint Committee for Guides in Metrology, Bureau International des Poids et Mesures, JCGM 102, 2011.
4. Evaluation of measurement data. *Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100, GUM 1995 with minor corrections*, 1st edn. (2008).
5. Васілевський О. М. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення: [навчальний посібник] / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 214 с.
6. Elster, C., Eichstädt, S., Link, A., Uncertainty evaluation of dynamic measurements in line with GUM, In *XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology* (2009).
7. Vasilevskiy, O. M., Methods of determining the recalibration interval measurement tools based on the concept of uncertainty, *Technical Electrodynamics*, 6, 81 (2014).
8. Gihan Gomah, A traceable time interval measurement with a reduced uncertainty, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6, 301 (2015).
9. Vasilevskiy, O. M., Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 5, 403 (2014).

10. Васілевський О. М. Нормування показників метрологічної надійності / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 9 – 13.
11. Vasilevskiy, O.M., Metrological characteristics of the torque measurement of electric motors, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 7 (2017).
12. Esward, T.J., Elster, C., Hessling, J.P., Analysis of dynamic measurements: new challenges require new solutions, in *Proc. of XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology* (2009).
13. Bisikalo, O.V., Vasilevskiy, O.M., Evaluation of uncertainty in the measurement of sense of natural language constructions, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 6 (2017), DOI 10.1051/ijmqe/2017001.
14. Eichstädt, S., Link, A., Elster, C., Dynamic Uncertainty for Compensated Second-Order Systems, *Sensors*, 10, 7621 (2010).
15. Vasilevskiy, O.M., Advanced mathematical model of measuring the starting torque motors, *Technical Electrodynamics*, 6, 76 (2013).
16. Eichstädt, S., Elster, C., Smith, I.M. and Esward, T.J., Evaluation of dynamic measurement uncertainty – an open-source software package to bridge theory and practice, *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 97–105 (2017).
17. Vasilevskiy, O.M., Yakovlev, M.Yu., Kulakov, P.I., Spectral method to evaluate the uncertainty of dynamic measurements, *Tekhn. Elektrodin.* 4, 72 (2017).
18. Vasilevskiy, O.M., A frequency method for dynamic uncertainty evaluation of measurement during modes of dynamic operation, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6, 202, (2015).
19. Васілевський О.М., Кучерук В.Ю., Володарський С.Т. Основи теорії невизначеності вимірювань: [підручник]. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 230 с.
20. Vasilevskiy, O.M., Kulakov, P.I., Ovchynnikov, K.V., Didych, V.M., Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 25, 2017, DOI: 10.1051/ijmqe/2017019.
21. Vasilevskiy, O.M., Kulakov, P.I., Didych, V.M., Technique Of Research Uncertainty Dynamic Measurements Of Vibration Acceleration Of Rotating Machines, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 11, 05, pp. 34-39 (2016), DOI: 10.9790/1676-1105033439.
22. Vasilevskiy, O.M., Kulakov, P.I., Dudatiev, I.A., Didych, V.M., Kotyra Andrzej, Suleimenov Batyrbek, Assembay Azat, Ainur Kozbekova Ainur, *Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical motors mechanical parameters, Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104456C* (August 7, 2017).
23. Broch, J.T. Mechanical Vibrations and Shock measurements. 2nd edition. Brüel & Kjær (1984).
24. Сопрунюк П.М., Василевский А.Н., Чабанюк Ю.А. Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 7. - С. 72-75.
25. IEC 60747-14-4:2011, *Semiconductor devices - Discrete devices - Part 14-4: Semiconductor accelerometers* (IEC, Switzerland, 2011).
26. Vasilevskiy, O.M., Kucheruk, V.Y., Bogachuk, V.V., Gromaszek, K., Wójcik, W., Smailova, S., Askarova, N., The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty, *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2016, 1003127* (September 28, 2016), DOI:10.1117/12.2249195.
27. ISO 2954:2012, *Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery - Requirements for instruments for measuring vibration severity*, (ISO, Switzerland, 2012).
28. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів : [монографія] / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. - Вінниця: ВНТУ. – 2011. – 176 с.
29. Anderson Maina, Ian Veldman, Henning Ploug, NMISA, KEBS, BKSV tri-lateral vibration comparison results, *ACTA IMEKO*, Volume 5, Number 1, 69-80 (2016).
30. Wheeler D.J., An Honest Gauge R&R Study. Manuscript No. 189, 2009.
31. Doscher, J., *Accelerometer Design and Applications, Analog Divices* (1998).
32. Podzharenko, V.O., Vasilevskiy, O.M., Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement, *Proceedings of Donetsk National Technical University*, 2005.