

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІБРОЗМІЩЕННЯ ЄМНІСНИМ СЕНСОРОМ В ЧАСОВИЙ ІНТЕРВАЛ

¹Вінницький національний технічний університет;

²ТОВ «КСК-Автоматизація» Вінницька філія

Згідно з міжнародним досвідом проведення досліджень для кожної групи машин від 15 кВт до 500 МВт подано гранично допустимі нормовані значення віброзміщення, відповідного їхньому вібраційному стану. Сформульовано актуальність визначення характеру сигналу вібрації і вибору відповідних інструментів для його оцінювання.

Проведено аналіз послідовності перетворення значення віброзміщення у величину вихідної напруги ємнісним сенсором і встановлено, що особливістю такого перетворювача є довге вимірювальне коло, а отже, і більша похибка порівняно з безпосереднім вимірювальним перетворенням віброзміщення в часовий інтервал.

Запропоновано структурну схему та математичну модель вимірювального перетворення значення віброзміщення у величину ємності конденсатора. Отримано аналітичну та графічну залежності ємності параметричного сенсора від переміщення пластин під дією віброзміщення в обґрунтованому діапазоні їхньої можливої зміни від 20 до 120 мкм. Встановлено, що у такому діапазоні зміни віброзміщення, ємність конденсатора змінюється в межах від 3 до 18 нФ.

Отримано математичну модель вимірювального перетворення величини віброзміщення в часовий інтервал та наведено графічну залежність тривалості часового інтервалу від зміни переміщення пластин під дією віброзміщення у встановленому діапазоні руху пластин конденсатора від 20 до 120 мкм. Показано, що значення часового інтервалу в цьому діапазоні від 100 до 320 мкс.

Запропоновано схему ємнісного вимірювального перетворювача віброзміщення в часовий інтервал та часові діаграми, що пояснюють принцип його дії. Показано, що під час подальшого вимірювального перетворення величини часового інтервалу у двійковий код можна забезпечити значення похибки квантування, яка не перевищує 0,1 %. Близькою до цієї величини є і похибка від зони нечутливості компаратора.

Застосування такого підходу дозволить формалізувати проведення подальших досліджень вимірювальних каналів цифрових систем вібромоніторингу електромеханічних систем і комплексів.

Ключові слова: ємнісний сенсор, віброзміщення, функція перетворення, чутливість, вимірювальний параметричний перетворювач, математична модель.

Вступ

На сьогодні основною технічною та технологічною складовою будь-якого виробничого підприємства є машини. Одним з основних параметрів контролю стану роботи обладнання в автоматизованих системах є допустимі значення вібрацій машин, двигунів та редукторів. Адже неперервна процедура контролю саме цього параметра дозволяє спрогнозувати і попередити аварійні ситуації, що можуть призвести до зупинки конкретної машини і всього виробництва в цілому.

Надзвичайно важливу роль під час вимірювання вібрації в широкому частотному діапазоні відіграє вибір параметра (віброзміщення, віброшвидкість, віброприскорення), особливо тоді, коли віброакустичний сигнал містить багато складових з різними частотами [1]. Сенсори віброзміщень зазвичай використовуються для низькочастотних коливань (нижче 1000 Гц), до прикладу, у підшипниках ковзання турбомашин. Таким типом сенсорів можна досить точно встановити проблеми

з дисбалансом та зміщеннями. Для вібрацій, частота яких вище 1000 Гц, їхню амплітуду важко розрізнити на рівні завод, тому використання сенсора віброзміщень недоцільно [2].

Оцінка вібраційного стану машини зазвичай здійснюється за двома загальними критеріями. За першим критерієм порівнюють абсолютні значення параметра вібрації в широкій смузі частот, за другим критерієм — зміни цього параметра.

Для оцінювання вібраційного стану машин як основний вібраційний параметр беруть в загальному випадку віброшвидкість. Але для машин з низькою частотою обертання складова віброшвидкості на оборотній частоті є домінуючою. Тому використання цього критерію оцінювання, заснованого лише на вимірюванні віброшвидкості без урахування частоти вібрації, може призвести до неприйнятно великих значень похибки. У таких випадках для підвищення точності вібромоніторингу доцільно надавати переваги сенсорам віброзміщень.

В процесі оцінювання спершу необхідно визначити межі для абсолютних значень параметрів вібрації, встановлених за умови наявності допустимих динамічних навантажень на підшипники і допустимої вібрації, що передається ззовні на опори і фундамент. В подальшому максимальне значення цього параметра, виміряне в кожному вузлі (підшипник, опора), порівнюють з гранично допустимими [3].

Для достовірної оцінки вібраційного стану машини та прийняття адекватних рішень про необхідні дії у конкретній ситуації, відповідно до міжнародного досвіду проведення досліджень, встановлені такі зони вібраційного стану машин [3]:

Зона А — в цю зону потрапляє, зазвичай, вібрація нових машин, що вводяться в експлуатацію.

Зона В — машини, вібрація яких потрапляє до цієї зони, зазвичай вважають придатними для експлуатації без обмеження термінів.

Зона С — машини, вібрація яких потрапляє в цю зону, зазвичай вважають непридатними для тривалої безперервної експлуатації. Такі машини можуть функціонувати обмежений період до початку ремонтних робіт.

Зона D — рівні вібрації в цій зоні зазвичай можуть викликати серйозні пошкодження машин.

С.К.З. переміщення, мкм	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
120	D	D	D	D
90	D	D	D	D
71	C	D	D	D
57	C	C	D	D
56	C	C	D	D
45	B	C	C	D
36	B	B	C	C
29	B	B	B	C
22	A	B	B	B
18	A	A	B	B
11	A	A	A	B
0	A	A	A	A

Рис. 1. Значення граничних зон вібраційного стану машин для жорстких фундаментів:

Група 1 — машини номінальною потужністю понад 300 кВт, але не більше ніж 50 МВт; електричні машини з висотою осі обертання валу більше 315 мм;
Група 2 — машини номінальною потужністю від 15 до 300 кВт; електричні машини з висотою осі обертання валу від 160 до 315 мм;
Група 3 — насоси відцентрового типу зі змішаними або осьовими потоками з роздільним приводом та номінальною потужністю понад 15 кВт;
Група 4 — насоси відцентрового типу зі змішаними або осьовими потоками з вбудованим приводом та номінальною потужністю понад 15 кВт

– обладнання, швидкість і навантаження якого змінюються з часом.

Оскільки встановлено такий розподіл сигналів вібрації, то їхня оцінка також залежить від визначення характеру цих сигналів та вибору відповідних інструментів. Адже неправильно підібраний інструмент оцінювання може призвести до неправильного виявлення несправностей.

Відомо багато потужних інструментів для оцінювання нестационарних вібраційних сигналів, до

На рис. 1 показано значення граничних зон вібраційного стану машин для жорстких фундаментів.

Отже, як видно з рис. 1, чинними нормативними документами чітко визначено гранично допустимі норми значення віброзміщення для кожної групи машин та відповідного вібраційного стану.

Більшість динамічних вібраційних сигналів вважаються стохастичними через наявність у сигналі випадкового шуму, які так само поділяються на стаціонарні та нестационарні. Тобто існують об'єкти на яких вібрація є стаціонарним процесом та є об'єкти, на яких вібрація є нестационарним процесом.

Стаціонарні сигнали — це сигнали, стохастичні властивості яких залишаються постійними з часом. Приклади обладнання, яке створює стаціонарну вібрацію:

- вібросита, млини та скрубери що працюють з постійною частотою коливань;
- редуктори та двигуни, що працюють з постійним навантаженням та частотами обертання валів.

Прикладами обладнання, яке створює нестационарну вібрацію, є:

- транспортні засоби, що рухаються по пересіченій місцевості;
- пуск і зупинка обладнання;

прикладу, застосування вейвлет-перетворень у задачах моніторингу, вібродіагностики машин та обладнання [4].

Стационарні вібраційні сигнали можна аналізувати за допомогою стандартних інструментів спектрального аналізу, але на сьогодні практично відсутні математичні моделі для таких сенсорів. Тому неможливо оцінити їхні основні статичні метрологічні характеристики ще на стадії проектування.

Найчастіше величину сигналу віброзміщення перетворюють сенсором в напругу або в часовий інтервал. На рис. 2 показано структурну схему вимірювальних перетворень віброзміщення ємнісним сенсором в напругу.

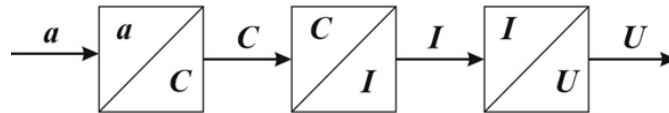


Рис. 2. Структурна схема вимірювальних перетворень віброзміщення ємнісним сенсором в напругу

Очевидно, величина віброзміщення спочатку перетворюється у величину ємності, потім значення ємності перетворюється в значення струму, а далі струм — в напругу. Недоліком таких сенсорів є довге коло вимірювального перетворення неелектричної величини віброзміщення в електричну напругу, що призводить до значної похибки. До прикладу, похибки інтегральних акселерометрів компанії Analog Devices, які досить широко застосовується в системах вібромоніторингу (рис. 3), можуть сягати 2 %.

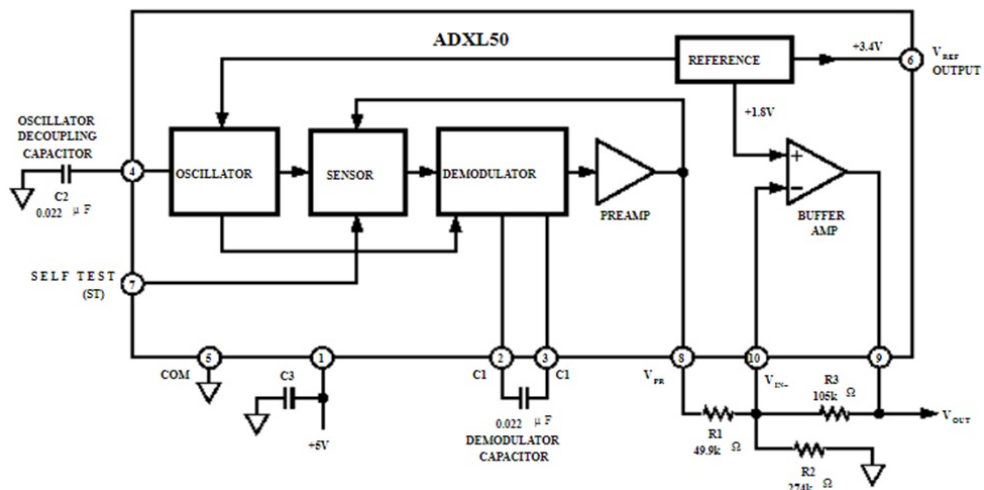


Рис. 3. Схема інтегрального акселерометра компанії Analog Devices ADXL50 [5]

Тому для підвищення точності вимірювального перетворення віброзміщення в електричну величину запропоновано фізичну величину ємності сенсора безпосередньо перетворювати в часовий інтервал, а не в проміжне значення напруги.

Метою дослідження є розробка математичної моделі вимірювального перетворення фізичної величини віброзміщення в часовий інтервал параметричного ємнісного сенсора, яка порівняно з відомими моделями адекватніше описує процес конвертування неелектричної величини в електричну.

Модель вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал

Практичний досвід впровадження систем вібромоніторингу на виробничих підприємствах показав, що в переважній більшості експлуатуються машини, вібрація яких змінюється в діапазоні від 20 до 120 мкм в залежності від стану конкретної машини, що повністю відповідає ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-3:2014 Вібрація.

Експериментальні дослідження показали, що сигнал вібрації таких машин має декілька гармонік, які в сумі утворюють полігармонічне коливання, вигляд яких показано на рис. 4.

Як перетворювач неелектричної величини — віброзміщення, в електричну величину — ємність, використано ємнісний сенсор — плоский конденсатор. Подальші дослідження будемо проводити з використанням плоского конденсатора. Під дією віброзміщення відстань між пластинами

конденсатора буде змінюватися, а отже, і буде змінюватися ємність конденсатор. Для підвищення значення ємності та точності вимірювання використано сенсор, який має 54 елементарних ємнісних комірок, з'єднаних паралельно [6].

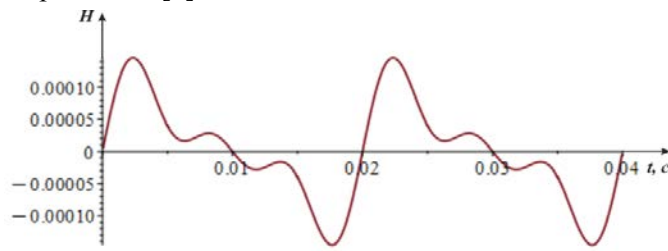


Рис. 4. Графік полігармонічного коливання віброзміщення

Схема з'єднання ємнісних комірок такого сенсора показана на рис. 5.

Узагальнену структурну схему вимірювальних перетворень віброзміщень a в часовий інтервал τ ємнісного сенсора подамо, як показано на рис. 6.

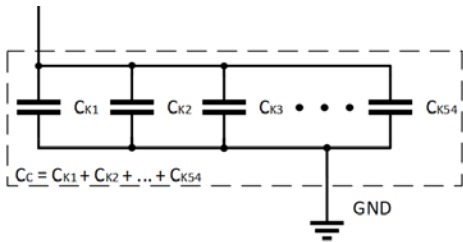


Рис. 5. Схема з'єднання комірок ємнісного сенсора

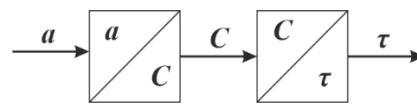


Рис. 6. Структурна схема вимірювальних перетворень ємнісного сенсора

Якщо розглянути одну елементарну комірку, то в стані спокою або під час руху сенсора з постійною швидкістю рухомий електрод знаходиться на однаковій відстані від нерухомих електродів. За будь-якого прискорення ємнісного сенсора, викликаного значеннями вібрації, рухомий електрод елементарної комірки наближається, наприклад, до нерухомого електрода та відповідно віддаляється від нерухомого електрода, або навпаки. В результаті такого руху, відносно переміщення рухомого електрода стає неоднаковим, а ємність між ним та кожним з нерухомих електродів змінюється відповідно до значення віброзміщення.

Ємність однієї елементарної комірки подамо таким рівнянням перетворення:

$$C_K = \frac{\xi \xi_0 S}{a}, \tag{1}$$

де $\xi \approx 1$ — діелектрична проникність повітря, Ф/м; $\xi_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ — електрична постійна, Ф/м; $S = 0,791 \cdot 10^{-3}$ — площа пластин конденсатора, м²; a — переміщення пластин під дією вібрації (віброзміщення), м.

Оскільки сенсор вібрації містить в собі $n = 54$ елементарних комірок, то сумарну ємність такого вимірювального перетворювача визначимо так:

$$C_C = n \cdot C_K, \tag{2}$$

Графічна залежність ємності сенсора вібрації від переміщення пластин під дією віброзміщення в діапазоні: $a = 20 \cdot 10^{-6} \dots 120 \cdot 10^{-6}$ м показана на рис. 7.

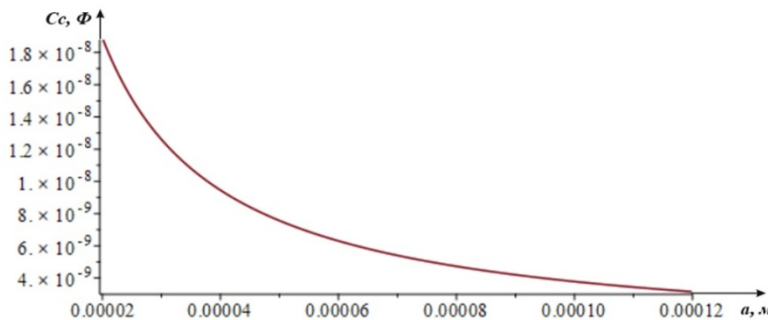


Рис. 7. Графік залежності ємності сенсора вібрації від переміщення пластин

З рис. 7 видно, що зі зміною відстані між пластинами a від 20 до 120 мкм, ємність конденсатора цього сенсора вібрації змінюється відповідно в діапазоні від 3 до 18 нФ.

Принцип дії показаного на рис. 8 вимірювального перетворювача такий. У вихідному положенні конденсатор (усі 54 конденсаторні комірки) розряджений ($U_C = 0$ В) і на виході джерела опорної напруги ДОН $U_0 = 0$ В.

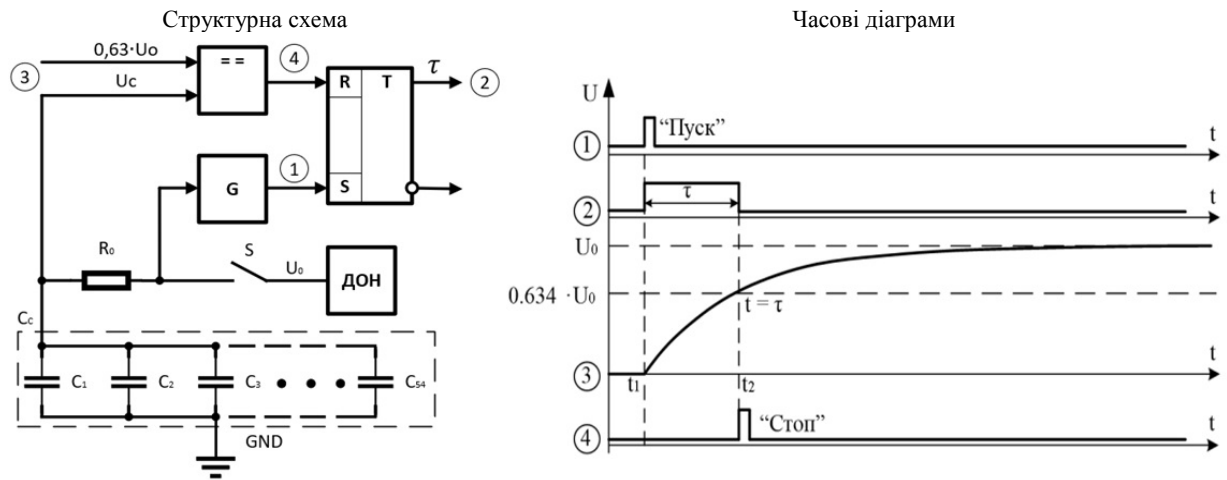


Рис. 8. До питання перетворення фізичної величини ємності в часовий інтервал

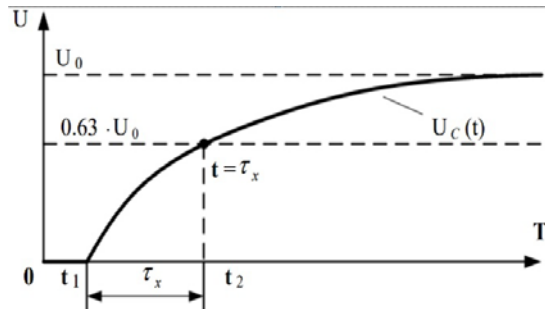


Рис. 9. До питання виділення постійної часу

обкладинках конденсатора в цей момент часу:

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{0}{\tau}}\right) = U_0 (1 - e^0) = U_0 (1 - 1) = 0 \text{ В} \quad |t = 0, \quad (2)$$

В момент часу t_2 (рис. 9), коли координата часу t дорівнює τ , напруга U_C на конденсаторі C_C досягає такого значення:

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U_0 (1 - e^{-1}) = 0,63 \cdot U_0 \quad |t = \tau. \quad (3)$$

Відповідно часовий інтервал $t_2 - t_1$ є сталою τ електричного кола $R \cdot C_C$ кола

$$\tau = t_2 - t_1. \quad (4)$$

Виходячи з цього, виникає схемотехнічна задача виділення початку цього часового інтервалу (момент часу t_1) і його закінчення (момент часу t_2).

Виділення сталої часу τ часового інтервалу $t_2 - t_1$ реалізує вимірювальний перетворювач (рис. 8).

Початок (t_1) цього часового інтервалу виділяється одновібратором G в момент часу ($t = 0$) після замикання перемикача S (сигнал «Пуск» — точка 1), а кінець — в момент часу ($t = \tau$) — (сигнал «Стоп» на виході компаратора).

На один зі входів компаратора подається напруга $U_C(t)$, що зростає на конденсаторі C_C . На другому вході компаратора подільником напруги формується $0,63$ від значення опорної напруги U_0 . В момент часу t_2 , коли $t = \tau$ напруга $U_C(t)$ на конденсаторі досягає значення $0,63 U_0$. На обох входах компаратора сформовані однакові значення напруг і він на своєму виході формує сигнал «Стоп» — кінець часового інтервалу точка 4. Короткі прямокутні імпульси «Пуск» і «Стоп» по S і R входах

відповідно встановлюють тригер в стан логічної «1» або логічного «0». Тривалість імпульсу τ , що дорівнює проміжку часу $t_2 - t_1$, відповідає рівню логічної «1».

Отже, рівняння перетворення фізичної величини ємності в часовий інтервал має вигляд

$$\tau = R_0 \cdot C_K. \quad (5)$$

Підставимо з (1) рівняння, що однозначно пов'язує ємність конденсатора зі значенням віброзміщення, отримаємо остаточну функцію перетворення

$$\tau = R_0 \frac{\xi \xi_0 S}{a}. \quad (6)$$

Графічна залежність тривалості постійної часу τ від значення віброзміщення в діапазоні від $a = 20 \cdot 10^{-6}$ до $120 \cdot 10^{-6}$ [м] показана на рис. 10.

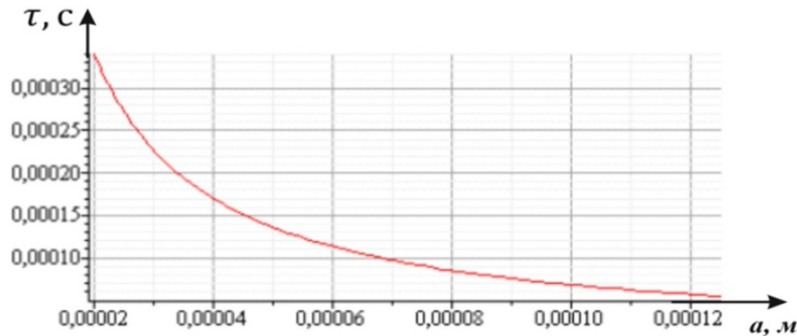


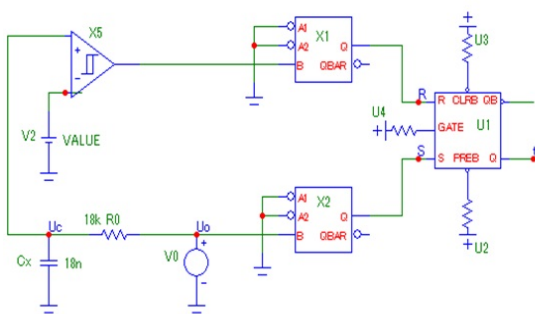
Рис. 10. Графічна залежність тривалості постійної часу від віброзміщення

З поданої статичної характеристики видно, що запропонований ємнісний сенсор віброзміщень у заданому діапазоні їхньої зміни перетворює інформативний параметр в часовий інтервал τ відповідно від 100 до 325 мкс. Якщо проквантувати цей часовий інтервал τ періодами T_0 зразкової частоти $f_0 = 10 \cdot 10^7$ Гц з виходу кварцового резонатора, то в такому діапазоні зміни τ максимальне значення похибки квантування не перевищує 0,1 %.

Такий порядок має і похибка виділення часового інтервалу одновібратором і компаратором. Тому реалізація вимірювального каналу вібрацій на основі запропонованого параметричного ємнісного сенсора створює потенціальні можливості вимірювання вібрацій з вищою точністю. До того ж, вихідний сигнал такого сенсора є частотним, що і забезпечує підвищену завадостійкість порівняно з ємнісними сенсорами з вихідним сигналом у вигляді струму або напруги.

Адекватність розробленої математичної моделі вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал підтверджено комп'ютерним моделюванням цього сенсора в програмному середовищі MicroCap, результати якого показані на рис. 11.

Модель вимірювального перетворювача в середовищі MicroCap



Часові діаграми результатів моделювання вимірювального перетворення

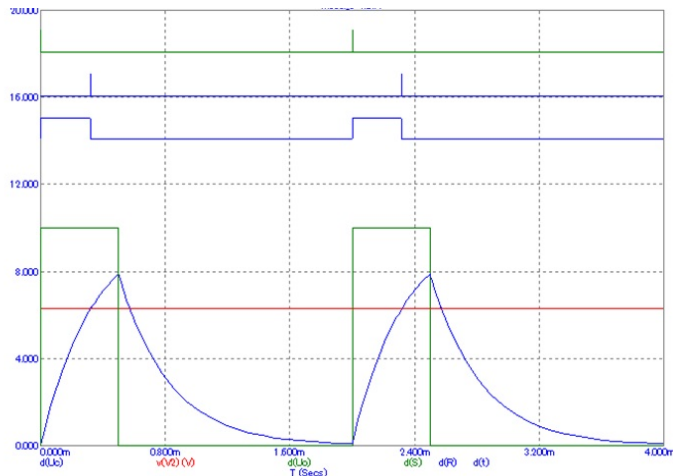


Рис. 11. Результати комп'ютерного моделювання вимірювального перетворювача ємність–часовий інтервал

Висновки

Відповідно до міжнародного досвіду проведення вібромоніторингу наведено гранично допустимі норми значення віброзміщення для кожної з чотирьох груп машин від 15 кВт до 500 МВт та їхнього відповідного вібраційного стану. Проаналізовано послідовність вимірювального перетворення фізичної величини віброзміщення в електричну напругу ємнісним сенсором і показано, що воно має довге вимірювальне коло і тому більшу методичну похибку порівняно з безпосереднім перетворенням віброзміщення в часовий інтервал.

Вперше розроблено функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину ємності конденсатора з вхідною величиною значення віброзміщення. В результаті моделювання цього рівняння перетворення встановлено, що в регламентованому для чотирьох типів машин діапазоні можливої зміни віброзміщень (від 20 до 120 мкм) ємність конденсатора пропонованого параметричного сенсора змінюється відповідно від 3 до 18 нФ.

Розроблено математичну модель, структурну схему і часові діаграми роботи вимірювального параметричного перетворювача віброзміщення a в часовий інтервал τ . Результати моделювання отриманої функції безпосереднього перетворення $a(\tau)$ дозволяють стверджувати, що в діапазоні зміни віброзміщення $a \in 20 \dots 120$ мкм, тривалість часового інтервалу відповідно змінюється в межах $\tau \in 100 \dots 325$ мкс. До того ж, такий часовий інтервал є достатнім для забезпечення нормованого значення похибки квантування $\delta_{\text{кв}} \leq 0,1$ % в процесі його подальшого перетворення у двійковий код.

Застосування такого підходу дозволить формалізувати проведення перспективних теоретико-експериментальних досліджень вимірювальних каналів час-імпульсного перетворення систем вібромоніторингу електромеханічних систем і комплексів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Кухарчук, та ін., *Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014, 169 с.
- [2] M. H. M. Ghazali, and W. Rahiman, "Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis," *A Systematic Review Hindawi, Shock and Vibration*, vol. 2021, Article ID 9469318, 25 p. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
- [3] ДСТУ ГОСТ ІСО 10816-3:2014 *Вібрація. Контролювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на необертюваних частинах. Частина 3. Промислові машини номінальною потужністю більше ніж 15 кВт і номінальною швидкістю від 120 хв⁻¹ до 15000 хв⁻¹ (ГОСТ ІСО 10816-3-2002, MOD; IDT)*.
- [4] С. Ш. Качив, і В. В. Кухарчук, «Застосування вейвлет-перетворень в задачах моніторингу та вібродіагностування машин та обладнання.» *Наукові праці ВНТУ*, № 3, с. 12-18, 2009.
- [5] *ADXL50AH Datasheet One Technology Way, P. O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.*
- [6] В. В. Кухарчук. *Основи метрології та електричних вимірювань. Частина II*, консп. лекцій. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2020, 154 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.04.2024

Осельський Олександр В'ячеславович — аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету; провідний інженер з автоматизованих систем керування виробництвом; ТОВ «КСК-Автоматизація» Вінницька філія, Вінниця, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com ;

Кухарчук Василь Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Oselskyi^{1,2}
V. V. Kukharchuk¹

Mathematical Model for Measuring Transformation of Vibration Displacement by Capacitive Sensor into a Time Interval

¹Vinnytsia National Technical University;

²«CSC-Automation» Ltd Vinnytsia office

In accordance with the international research experience, the maximum allowable normalized vibration displacement values for each group of machines from 15 kW to 500 MW to their respective vibration state are given. The importance of determining the nature of the vibration signal and choosing the appropriate tools for its evaluation is formulated.

The analysis of the sequence of the conversion of the vibration displacement into the output voltage by a capacitive sensor, which has a long measuring circle and therefore a large error compared to the direct measurement conversion of the vibration displacement into a time interval, was carried out.

Structural diagram and a mathematical model for measuring the conversion of vibration displacement into capacitor capacity are proposed. Analytical and graphical dependence of the capacity of the parametric sensor on the displacement of the plates under the action of vibration displacement in the justified range of their possible change from 20 to 120 μm was obtained. It was established that in this range of changes in vibration displacement, the capacity of the capacitor changes within such limits from 3 to 18 nF.

A mathematical model for measuring the transformation of vibration displacement into a time interval was obtained and a graphical dependence of the duration of the time interval τ on the change in the displacement a of the plates under the action of vibration displacement in the set range of movement of the capacitor plates from 20 to 120 μm was given. It is shown that the value of the time constant in this range varies from 100 to 325 μs .

A scheme of a capacitive measuring transducer of vibration displacement in a time interval and time diagrams explaining the principle of its operation are proposed. It is shown that the quantization error will not exceed 0.1 % during further measurement conversion into a binary code. The error from the insensitivity zone of the comparator is of the same order.

The use of such an approach will allow formalizing further research into the measuring channels of vibration monitoring systems of electromechanical systems and complexes.

Keywords: capacitive sensor, vibration displacement, conversion function, sensitivity, mathematical model.

Oselskyi Oleksandr V. — Post-Graduate Student of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes of Vinnytsia National Technical University; Senior Engineer for Automated Production Control Systems of the «CSC-Automation» Ltd Vinnytsia office, e-mail: oselskyi.ov@gmail.com ;

Kukharchuk Vasyl V. — Dr Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Computerized Electromechanical Systems and Complexes