

Technical sciences

УДК 531.768

Аллахверанов Рауф Юсіф огли

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри КІТАР

Харківський національний університет радіоелектроніки

Allakhveranov Rauf

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

Невлюдова Вікторія Валеріївна

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри КІТАР

Харківський національний університет радіоелектроніки

Nevliudova Viktoriia

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

Горяїнов Ілля Олексійович

магістрант

Харківського національного університету радіоелектроніки

Goryayinov Ilya

Master Student of the

Kharkiv National University of Radio Electronics

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В АКСЕЛЕРОМЕТРІ З
РЕОСТАТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
MODELING OF PROCESSES IN AN ACCELEROMETER
WITH A RHEOSTAT TRANSDUCER**

Анотація. Побудовано математичну модель процесів, які відбуваються в акселерометрах під час вимірювань прискорень різного виду, що представлена у формі диференціального рівняння, котре одержано з використанням електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду та відповідних початкових умов.

Ключові слова: акселерометр, моделювання, математична модель, вимірювання, прискорення, диференціальні рівняння, похибка.

Summary. A mathematical model of the processes that occur in accelerometers during measurements of accelerations of various types is constructed, which is presented in the form of a differential equation obtained using electromechanical analogies and Lagrange equations of the 2nd kind and the corresponding initial conditions.

Key words: accelerometer, modeling, mathematical model, measurement, acceleration, differential equations, error.

Вступ. У сучасних акселерометрах вимірюване прискорення, зазвичай, перетворюється на відповідну йому електричну напругу, котру досить легко можна вимірювати за допомогою електронних вимірювальних пристроїв як цифрового, так і аналогового типу, а також передавати різними способами на досить великі відстані від безпосереднього місця розташування чутливого елемента датчика. Отже, сучасні акселерометри насправді є досить складними мехатронними пристроями, в яких присутня механічна та електронна частини, котрі помітно впливають одна на одну.

Далі розглянемо математичне моделювання процесів, які відбуваються в акселерометрах із реостатними перетворювачами вимірюваного прискорення до вимірювального сигналу у вигляді відповідної електричної напруги. Такі акселерометри використовують,

зазвичай, для вимірювання досить великих прискорень у технічних системах, переважно промислового призначення.

Розрахункова схема акселерометра. Схематизація акселерометра, що має реостатний перетворювач вимірюваного прискорення на відповідну вимірювальну електричну напругу, наведена на рис. 1.

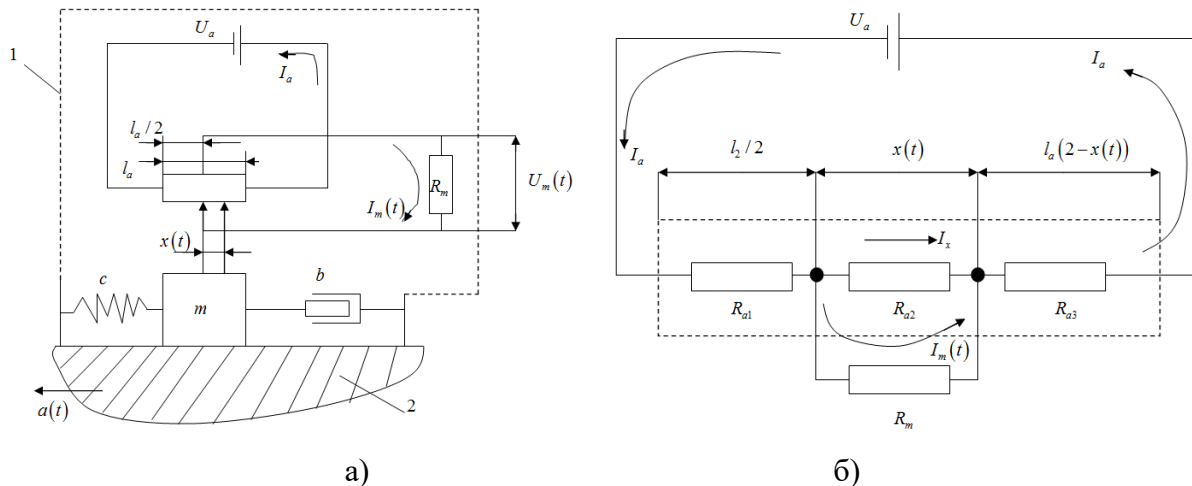


Рис. 1. Схематизація акселерометра з реостатним перетворювачем

Взаємодія механічної та електронної частини акселерометра показана на рис. 1, а. Акселерометр-1 є окремим спеціальним пристроєм, який встановлюють на рухомому об'єкті-2 з метою вимірювання прискорення цього об'єкта, що у загальному випадку залежить від часу (рис. 1, а):

$$a = a(t), \quad (1)$$

де a – вимірюване прискорення рухомого об'єкта, на якому встановлений акселерометр;

t – час.

Обов'язковими елементами (рис. 1, а) механічної частини будь-якого акселерометра є інерційний елемент з еквівалентною масою m , пружний елемент з еквівалентною жорсткістю b , а також в'язкий елемент, який характеризується параметром ρ . Унаслідок прискорення (1) об'єкта, на якому встановлений акселерометр (рис. 1, а), інерційний елемент

акселерометра буде рухатись відповідно до прискорення (1) таким чином, що координата інерційного елемента акселерометра буде залежити від часу [1; 2]:

$$x = x(t), \quad (2)$$

де x – переміщення інерційного елемента акселерометра відносно центру реостата.

Електронна частина, що реалізує перетворення руху (2) інерційного елемента акселерометра (рис. 1), забезпечується живленням сталої напруги:

$$U_a = const, \quad (3)$$

де U_a – напруга живлення вимірюваного електричного ланцюга акселерометра.

Вимірювальна схема акселерометра (рис. 1) містить реостатний перетворювач, який містить загальний електричний опір R_m та довжину l , а також вимірювальний резистор опору R_a , з якого знімається вимірювальні напруга, котра відповідно до переміщення (2) та напруження живлення (3) є функцією часу:

$$U_m = U_m(t), \quad (4)$$

де U_m – напруга, що представляє переміщення інерційного елемента акселерометра.

Електричні струми у гілках вимірювального ланцюга акселерометра (рис. 1, б) відповідно до першого закону Кірхгофа обчислюються наступним чином [3]:

$$I_a = I_x + I_m, \quad (5)$$

де I_a – струм вимірюваного електричного ланцюга акселерометра;

I_x – частина струму вимірюваного електричного ланцюга акселерометра, що містить інформацію про переміщення $x(t)$ інерційного елемента;

I_m – частина струму вимірюваного електричного ланцюга акселерометра, яка формує вимірювальну напругу, котра містить інформацію про переміщення $x(t)$ інерційного елемента акселерометра.

Рухомий контакт реостата (рис. 1, б) розподіляє реостат на три частини, що мають відповідні опори в залежності від координати (2) інерційного елемента акселерометра. Для визначення опорів цих трьох частин доцільно ввести величину:

$$\rho_a = \frac{R_a}{l_a}, \quad (6)$$

де ρ_a – питомий опір на одиницю довжини реостата акселерометра;

R_a – загальний опір реостата акселерометра;

l_a – довжина реостата акселерометра.

Завдяки введеній величині (6) матимемо наступні результати для опорів частин реостата (рис. 1, б):

$$R_{a1} = \rho_a \frac{l_a}{2}, R_{a2} = \rho_a x, R_{a3} = \rho_a \left(\frac{l_a}{2} - x \right), \quad (7)$$

де R_{a1} – опір, який утворює падіння напруги на половині довжини реостата акселерометра;

R_{a2} – опір, який містить інформацію про переміщення $x(t)$ інерційного елемента акселерометра;

R_{a3} – опір, який містить інформацію про поточне положення інерційного елемента акселерометра.

За допомогою співвідношення (6) перетворимо результат (7) на остаточний вигляд (8).

$$R_{a1} = \frac{1}{2} R_a, R_{a2} = R_a \frac{x}{l_a}, R_{a3} = R_a \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l_a} \right), \quad (8)$$

Вимірювальна електрична напруга (4) буде визначатися опором вимірювального резистора та відповідним струмом:

$$U_m(t) = R_m I_m(t). \quad (9)$$

Зрозуміло, що вимірювальна напруга (9) залежатиме певним чином від закону зміни у часі координати (2) інерційного елемента акселерометра. Таким чином, акселерометр можна представити співвідношенням виду:

$$a(t) \xrightarrow{W_1} U_m(t) \xrightarrow{W_2} \tilde{a}(t), \quad (10)$$

де W_1 – відображення вимірюваного прискорення $a(t)$ у вимірювальну напругу $U_m(t)$ акселерометра;

$\tilde{a}(t)$ – оцінка вимірюваного прискорення $a(t)$ за показанням вимірювальної напруги $U_m(t)$;

W_2 – відображення вимірювальної напруги $U_m(t)$ в оцінку $\tilde{a}(t)$ вимірюваного прискорення $a(t)$.

Вид відображення W_1 із співвідношення (10) визначається виключно конструкцією акселерометра. Зрозуміло, що таке відображення буде характеризуватися притаманною йому похибкою. Відображення W_2 , вид якого має відповідати конструкції акселерометра, реалізується окремо від акселерометра.. Зрозуміло, що з суто теоретичних міркувань має бути $W_2 = W_1^{-1}$, але побудова та реалізація такого відображення має певні технічні труднощі, отже, зазвичай, маємо $W_2 \neq W_1^{-1}$, що також вносить певну похибку до результату вимірювання (10). Таким чином, під час виконання вимірювань прискорення насправді маємо результат із відносною похибкою, що обчислюватиметься так:

$$\varepsilon(t) = \frac{|a(t) - \tilde{a}(t)|}{|a(t)|} 100\%, \quad (11)$$

де $\varepsilon(t)$ – похибка вимірювання прискорення акселерометра.

Зрозуміло, що похибка (11) результату вимірювання прискорення акселерометром характеризує його якість, проте вона істотно залежить від

вимірюваного прискорення (1). Математичне моделювання процесів в акселерометрі необхідно, перш за все, для дослідження впливу залежності від часу вимірюваного прискорення (1) на похибку результату його вимірювання акселерометром.

Математична модель акселерометра. Для того, щоб протестувати та оцінити точність виміру акселерометра, можна використовувати математичне моделювання. Математичне моделювання дозволяє уявити роботу акселерометра як математичних рівнянь, які можна використовувати для аналізу його показників і продуктивності [4].

Одним із методів математичного моделювання акселерометра є моделювання його динаміки. Динамічна модель акселерометра може бути представлена у вигляді диференціальних рівнянь, що описують його поведінку в різних умовах.

Іншим методом математичного моделювання акселерометра є моделювання його електричних характеристик. Електрична модель акселерометра може бути представлена у вигляді електричних ланцюгів, які описують його поведінку в електричній схемі.

Для оцінки точності вимірювання акселерометра можна використовувати порівняння результатів, отриманих під час математичного моделювання, з реальними вимірами. Також можна використовувати методи статистичного аналізу з метою оцінки похибки вимірювань. Таким чином, математичне моделювання акселерометра є важливим інструментом для аналізу його характеристик та продуктивності. Воно дозволяє оцінити точність вимірювання акселерометра та визначити чинники, що впливають на його роботу.

Під час виконання досліджень математична модель акселерометра може значною мірою замінити акселерометр як пристрій, а в деяких випадках навіть забезпечити значно більші властивості щодо дослідження процесів, які відбуваються в акселерометрах протягом їхньої експлуатації.

Оскільки досліджувані величини є функціями часу, то математична модель процесів, які відбуваються в акселерометрі, має обов'язково містити звичайне диференціальне рівняння та початкові умови для його інтегрування, або навіть систему звичайних диференціальних рівнянь із відповідними початковими умовами.

Для побудови диференціальних рівнянь математичної моделі процесів в акселерометрі враховуємо прийняті припущення щодо їхньої схематизації (рис. 1) та використовуємо один із головних результатів аналітичної механіки – рівняння Лагранжа 2-го роду, а також поняття про електромеханічні аналогії. Відповідно до прийнятого в аналітичній механіці підходу стан досліджуваних процесів, які відбуваються в акселерометрі, відзначатимемо за допомогою узагальнених координат:

$$q_1 = q_1(t), q_2 = q_2(t), \dots, q_n(t), \quad (12)$$

де n – кількість ступенів вільності системи;

$q_1, q_2, \dots, q_n$ – узагальнені координати системи.

Узагальнені координати (12) насправді є набором незалежних параметрів, які дозволяють повністю визначити стан досліджуваного об'єкта – в даному випадку процесів, які відбуваються в акселерометрі. Оскільки досліджуваний акселерометр – це мехатронна система, то частина його узагальнених координат (12) матиме механічний сенс (координати та кути повороту), а інша частина – ,відповідно, електричний сенс (електричні заряди згідно з прийнятою електромеханічною аналогією).

Якщо зв'язки, що обмежують стан досліджуваної системи, є голономними, то диференціальні рівняння для визначення узагальнених координат (12) такої системи можуть бути представлені в узагальненій формі рівнянь Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

де L – функція Лагранжа, що позначає різницю між кінетичною та потенційною енергією системи;

R – дисипативна функція Релея, котра характеризує в'язкий опір та, у випадку лінійного в'язкого опору, дорівнює половині потужності сил в'язкого опору;

Q_k – узагальнена сила системи відповідно до узагальненої координати q_k .

Згідно з прийнятою схематизацією (рис. 1) стан процесів у досліджуваному акселерометрі обмежується лише законом Кірхгофа (5), тому в даному випадку (рис. 1) маємо електромеханічну систему з трьома ступенями вільності та узагальненими координатами, що можна прийняти у наступному вигляді:

$$n = 3, q_1 = x, q_2 = \int I_a dt, q_3 = \int I_m dt, I_x = \dot{q}_2 - \dot{q}_3, \quad (14)$$

де q_1 – узагальнена координата, що представляє переміщення маси акселерометра;

q_2 – узагальнена координата, що представляє електричний заряд у вимірювальному електричному ланцюзі акселерометра;

q_3 – узагальнена координата, що представляє частину електричного заряду у вимірювальному електричному ланцюзі акселерометра, що формує вимірювальну напругу U_m .

З урахуванням прийнятої схематизації досліджуваних процесів в акселерометрі (рис. 1) та узагальнених координат (14) матимемо функцію Лагранжа та функцію Релея в такому вигляді:

$$L = \frac{1}{2} m \left(v - \dot{q}_1 \right)^2 - \frac{1}{2} c q_1^2, \quad (15)$$

$$R = \frac{1}{2} b \dot{q}_1 + \frac{1}{2} R_{a1} \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} R_{a2} \left(\dot{q}_2 - \dot{q}_3 \right)^2 + \frac{1}{2} R_{a3} \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} R_m \dot{q}_3^2, \quad (16)$$

де v – швидкість об'єкта на якому встановлений акселерометр;

m – маса інерційного елемента акселерометра;

c – жорсткість інерційного елемента акселерометра;

b – пружність в'язкого елемента акселерометра.

Для визначення узагальнених сил, які потрібні для запису рівнянь Лагранжа 2-го роду (13), визначимо суму віртуальних робіт сил досліджуваної системи, що не є потенційними та дисипативними. З урахуванням прийнятої схематизації досліджуваних процесів в акселерометрі та з урахуванням узагальнених координат (14) сума віртуальних робіт у даному випадку запишеться так:

$$\delta A = v \delta q_1 + U_a \delta q_2 + v \delta q_3, \quad (17)$$

де δA – віртуальна робота сил досліджуваної системи;

q_1, q_2, q_3 – варіації відповідних узагальнених координат.

Вираз (17) призводить до наступного результату для узагальнених сил у досліджуваному акселерометрі відповідно до прийнятої схематизації:

$$Q_1 = 0, Q_2 = U_a, Q_3 = 0. \quad (18)$$

Таким чином, для функції Лагранжа (15), функції Релея (16) та узагальнених сил (18) рівняння Лагранжа 2-го роду при ведуть до таких співвідношень:

$$-m \frac{dv}{dt} + m \ddot{q}_1 + c q_1 = -b \dot{q}_1, \quad (19)$$

$$v = -R_{a1} \dot{q}_2 - R_{a2} \left(\dot{q}_2 - \dot{q}_3 \right) - R_{a3} \dot{q}_2 + U_a, \quad (20)$$

$$v = R_{a2} \left(\dot{q}_2 - \dot{q}_3 \right) - R_m \dot{q}_3. \quad (21)$$

Врахуємо, що швидкість та прискорення об'єкта, на якому встановлений акселерометр, зв'язані наступним співвідношенням:

$$\frac{dv}{dt} = a(t). \quad (22)$$

Отже, з урахуванням співвідношення (22) представимо диференціальне рівняння (19) у такому вигляді:

$$\ddot{q} + 2n\dot{q}_1 + \omega^2 q_2 = a(t), \quad (23)$$

$$n = \frac{b}{2m}; \omega^2 = \frac{c}{m}.$$

Вимірювальна напруга (4), що містить інформацію про прискорення (1) об'єкта, на якому встановлений акселерометр (рис. 1) з урахуванням визначень (14) узагальнених координат набуде такого вигляду:

$$U_m(t) = R_m \dot{q}_3(t). \quad (24)$$

Для визначення вимірювальної напруги (24), спочатку за допомогою співвідношення (21) обчислимо наступне:

$$\dot{q}_2 = \frac{R_m + R_{a2}}{R_{a2}} \dot{q}_3 \Rightarrow \dot{q}_2 = \left(1 + \frac{R_m}{R_{a2}}\right) \dot{q}_3. \quad (25)$$

Підставимо одержаний вираз (25) до співвідношення (20):

$$\left((R_{a1} + R_{a3}) + \left(\frac{R_{a1} + R_{a3}}{R_{a2}} + 1 \right) R_m \right) \dot{q}_3 = U_a$$

$$\left(\left(\frac{R_a}{2} \right) + R_a \left(\frac{1}{2} - \frac{q_1}{l_n} \right) + R_m \left(\frac{\frac{R_a}{2} + R_a \left(\frac{1}{2} - \frac{q_1}{l_a} \right)}{R_a \frac{q_1}{l_a}} + 1 \right) \right) \dot{q}_3 = U_a$$

$$\left(\left(R_a + R_a \frac{q_1}{l_a} + R_m \left(\frac{1 - \frac{q_1}{l_a}}{\frac{q_1}{l_a}} \right) + 1 \right) \right) \dot{q}_3 = U_a$$

$$\dot{q}_3 \left(R_a \frac{a_1}{l_a} \left(1 + \frac{a_1}{l_a} \right) + R_m \right) = U_a \frac{q_1}{l_a}$$

та отримаємо:

$$(R_{a1} + R_{a3}) \left(1 + \frac{R_m}{R_{a3}} \right) \dot{q}_3 + R_{a2} \left(\left(1 + \frac{R_m}{R_{a2}} \right) \dot{q}_3 - \dot{q}_3 \right) = U_a. \quad (26)$$

Виконаємо далі перетворення одержаного у вигляді (26) співвідношення та представимо його у такому вигляді:

$$\dot{q}_3 = U_a \frac{\frac{q_1}{l_a}}{R_m + l_a \frac{q_1}{l_a} \left(1 + \frac{q_1}{l_a} \right)}. \quad (27)$$

Завдяки співвідношенню (27) матимемо вимірювальну напругу (24) у такому вигляді:

$$U_m(t) = U_a \frac{\frac{q_1}{l_a}}{1 + \frac{R_a}{R_m} \frac{q_1(t)}{l_a} \left(1 + \frac{q_1(t)}{l_a} \right)}. \quad (28)$$

Таким чином, з урахуванням одержаних результатів (23), (28) та прийнятих визначень (14) узагальнених координат матимемо математичну модель процесів в акселерометрі (рис. 1) у такому вигляді:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2 x = a(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad (29)$$

$$U_m = U_a \frac{\frac{x}{l_a}}{1 + \frac{R_a}{R_m} \frac{x}{l_a} \left(1 + \frac{x}{l_a} \right)}. \quad (30)$$

Диференціальне рівняння та початкові умови (29) дозволять визначити закон залежності від часу координати (2) інерційного елемента акселерометра (рис. 1), що відповідає заданому прискоренню (1) об'єкта, на якому встановлений акселерометр. У вихідних умовах (29) прийнято, що в початковий момент часу інерційний елемент акселерометра був нерухомим та розташованим у положенні, що відповідає недеформованому пружному елементу (рис. 1). Співвідношення (30) дозволяє визначати закон залежності від часу вимірювальної напруги (4), відповідний руху (2) інерційного елемента акселерометра, котрий для заданого прискорення (1) визначається диференціальним рівнянням та початковими умовами (29). Отже, завдяки математичній моделі (29), (30) маємо можливість

досліджувати процеси в акселерометрі в межах прийнятої схематизації (рис. 1).

Похибка та діапазон вимірювань акселерометра. Похибка виміру акселерометра – це різниця між вимірним та реальним значенням прискорення. Похибка може бути викликана різними чинниками, зокрема, шумом, нелінійністю, гістерезисом і температурними змінами. Щоб забезпечити точність вимірювань, необхідно враховувати всі ці чинники під час розроблення та калібрування акселерометра.

Існує кілька методів оцінки похибки вимірювання акселерометра, у тому числі калібрування, порівняння зі стандартними вимірювальними приладами та аналіз даних вимірювань [5; 6]. Найбільш поширеним методом є калібрування, що містить порівняння вимірних значень з відомими стандартними значеннями. Калібрування може бути проведене як на стенді, так і в умовах експлуатації, щоб врахувати реальні умови роботи приладу [6].

Оцінка точності вимірювання акселерометра може бути проведена за допомогою статистичних методів, таких як аналіз дисперсії та графічні методи, зокрема, побудова гістограми розподілу значень [6]. Після оцінки точності вимірювань можна вжити заходів для покращення точності, наприклад, шляхом покращення конструкції приладу або калібрування.

Оптимальний вибір акселерометра та гіроскопа, зазвичай, перетворюється на складне математичне завдання. Необхідно визначити тип параметра, що вимірюється. Під час вимірювання вібрацій вимірюються вібраційні характеристики об'єкта. Під час вимірювання переміщення визначається швидкість та зміщення об'єкта, що знаходиться в русі. Іноді виникає необхідність оперативної оцінки похибки застосування акселерометра або гіроскопа, ґрунтуючись тільки на їхній технічній документації. Іноді доводиться робити вибір необхідного датчика, не маючи під рукою експериментального стенду. У зв'язку з цим

важко передбачити справжню поведінку структурованої моделі. Методи оцінки похибок, які вносяться акселерометром та гіроскопом, можуть бути дуже корисними в інженерному проектуванні.

Для оцінки прискорення (1) об'єкта, на якому встановлений акселерометр (рис. 1), слід використовувати математичну модель (29), (30), в якій відомим доцільно вважати вимірювальне напруження (4), а невідомим – прискорення (1).

Співвідношення (30) можна розглядати як рівняння відносно переміщення (2) інерційного елемента акселерометра при заданій вимірювальній напрузі (4). Отже, розв'язок такого рівняння дозволяє визначати переміщення інерційного елемента (2), що відповідає заданій вимірювальній напрузі (4). Основна складність визначення переміщення (2) інерційного елемента акселерометра при заданій вимірювальній напрузі (4) полягає в тому, що відповідне рівняння (30) є нелінійним. Водночас, бачимо, що нелінійність рівняння (30), яка наявна при визначенні переміщення (2) інерційного елемента акселерометра для заданої вимірювальної напруги (4), може бути доволі обмежена за умов значно більшого опору вимірювального резистора за опір реостата. Таким чином, у результаті матимемо наближене лінійне співвідношення такого вигляду:

$$R_m \gg R_a \Rightarrow U_m \approx U_a \frac{x}{l_a}. \quad (31)$$

За допомогою співвідношення (31) маємо можливість отримати переміщення (2) інерційного елемента акселерометра, що відповідає заданій вимірювальній напрузі (4) в такому вигляді:

$$x \approx \frac{l_a}{U_a} U_m. \quad (32)$$

Слід зазначити, що наближені лінійні співвідношення (31) та (32) насправді виконуються із досить малою похибкою за умов значно великого опору вимірювального резистора. Далі співвідношення (32) слід врахувати

в диференціальному рівнянні (29), в якому вважатимемо невідомим прискорення (1) об'єкта, на якому встановлений акселерометр (рис. 1). У результаті для заданої вимірювальної напруги (4) матимемо прискорення (1) у такому вигляді:

$$a(t) \approx \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_m(t) + 2n \frac{l_a}{U_a} \dot{U}_m(t) + \omega^2 \frac{l_a}{U_a} U_m(t). \quad (33)$$

Слід підкреслити, що наближеність одержаного результату (33) обумовлена використанням наближеного співвідношення (32). Водночас, похибка наближеного результату є досить малою за умов значно великого опору вимірювального резистора.

До того ж, слід розуміти, що результат (33) неможливо використовувати практично для визначення прискорення (1) за відомою вимірювальною напругою (4), оскільки дані про неї (4) містять похибки вимірювань, вплив яких значно підсилюється у разі диференціювання, що є добре відомим фактом. З урахуванням цієї обставини у виразі (33) нехтують доданками, що містять похідні вимірювальної напруги (4), отже, в результаті цього мають досить зрозуміле та нескладне співвідношення для наближеної оцінки (10) вимірюваного прискорення (1) у вигляді:

$$\tilde{a}(t) = \omega^2 \frac{l_a}{U_a} U_m(t). \quad (34)$$

Зрозуміло, що оцінка прискорення (1) у вигляді (34) є досить наближеною та має відносну похибку такого вигляду:

$$\varepsilon(t) = \frac{\left| a(t) - \omega^2 \frac{l_a}{U_a} U_m(t) \right|}{|a(t)|} 100\%. \quad (35)$$

Бачимо, що відносна похибка (35) оцінки (34) прискорення (1) залежить від часу, отже, в одні моменти часу ця похибка може бути досить малою та майже непомітною, а в деякі інші – може бути досить великою та неприпустимою. Зрозуміло, що залежність від часу відносної похибки (35) вимірювання прискорення (1) об'єкта, на якому встановлений

акселерометр, залежить від вигляду залежності від часу (31) цього прискорення. Таким чином, на одних рухах матимемо досить малу та непомітну відносну похибку вимірювання прискорення (1), а на деяких інших – відносна похибка (35) може бути досить великою. Зрозуміло, що під час використання акселерометра слід враховувати режими рухів, притаманні об'єкту, прискорення якого має вимірюватися цим акселерометром. Отже, дослідження впливу режимів рухів об'єктів на похибку вимірювання прискорення за допомогою акселерометрів є досить важливим питанням. Слід також підкреслити, що відносну похибку (35) неможливо обчислити для випадку прискорення, що дорівнює нулю.

Оцінка похибки вимірювання акселерометра є важливим кроком для забезпечення точності вимірювання та покращення його працездатності. Калібрування та оцінка точності вимірювань повинні проводитися регулярно для забезпечення найвищої точності вимірювань.

Висновки. Математичне моделювання процесів в акселерометрах дозволяє розв'язувати багато різноманітних інженерних задач щодо дослідження, проєктування й удосконалення акселерометричних датчиків та вимірювальних систем, які містять такі датчики. Перевагою математичного моделювання є можливість досліджувати такі процеси в акселерометрах, які ще не були виготовлені фізично, та можливість використовувати одержані результати для вдосконалення параметрів проєктованих моделей. Крім того, математичне моделювання процесів в акселерометрах дозволяє досліджувати властивості акселерометрів під час різних режимах експлуатації, в тому числі таких, які досить складно забезпечити під час проведення випробувань.

Література

1. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Первинні вимірювальні перетворювачі фізичних величин: навчальний посібник. Ужгород:

Видавництво УжНУ, 2018. 311 с.

2. Бурштинський М. В., Хай М. В., Харчишин Б. М. Давачі. Львів: ТзОВ «Простір М», 2013. 184 с.

3. Бабак В. П., Хандецький В. С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: підручник. К.: Либідь, 1999. 392 с.

4. Banerjee S., Raton B. Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications, 2nd Edition / FL: Chapman and Hall/CRC Press, Taylor & Francis Group, 2022. 433 pp.

5. Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Стадник Б. І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник. За ред. Є. С. Поліщука. Львів: Вид-во Бескид Біт. 2012. 618 с.

6. Кухарчук В.В., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т., Грабко В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Херсон: Олді-плюс, 2013. 538 с.