

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ СЕРІЇ ADXL(XXX) КОМПАНІЇ ANALOG DEVICES НА ОСНОВІ ЇХ УТОЧНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі відтворено уточнені електричні та математичні моделі мікромеханічних ємнісних акселерометрів серії ADXL(xxx) відомої американської компанії Analog Devices. Моделі були розроблені автором ще в 2009 р. з метою практичної перевірки окремих, введених у вихідні базиси теоретичної електротехніки та теоретичної механіки, положень. Останні в 2015 р. отримали нову якість з відкриттям (на підставі математичного дослідження структури рівнянь Лагранжа-Максвелла та порівняльного аналізу окремих класів електричних кіл) фізичного явища гіперсилової (гіпервалентної) взаємодії і лягли в основу авторської теорії узагальненого електричного кола, як складової теоретичної електротехніки та теорії динамічних систем. З відкриттям автором в 2020 р. нового принципу – принципу субпотенціальної та надінергійної гіперсилової взаємодії поміж структурно-топологічними елементами в динамічних системах довільної фізичної природи, зазначена теорія, на думку автора, здатна в індуктивний спосіб з позиції виявлених закономірностей в еволюційному русі електричних кіл, як динамічних систем, в гіперсиловому полі та власному фазовому просторі розв'язувати окремі задачі фундаментальної науки і відповідати на відповідні питання щодо природи сили, енергії, імпульсу, руху, простору та часу. Що ж до уточнених електричних моделей вищезгаданих акселерометрів, то, як свідчить характерний практичний та прагматичний інтерес до цих моделей з боку зацікавленої спільноти, вони не втратили своєї актуальності і дотепер. Зокрема ці моделі дозволяють розв'язувати важливі інженерні задачі, з-поміж яких побудова статичних та динамічних метрологічних характеристик мікромеханічних акселерометрів. В наявній роботі наведено побудову диференціальних рівнянь таких перетворювачів. До зазначеного варто додати, що наприкінці роботи автор торкнувся і актуального на сьогодні питання – питання академічної доброчесності.

Ключові слова: акселерометр, електрична та математична моделі, диференціальні рівняння, метрологічні характеристики, узагальнене електричне коло, топологічна структура, структурно-топологічні рівняння, динамічна система, електродинамічні аналогії, перша та друга системи узагальнених координат

Abstract

In article the author has recreated more exact electric and mathematical models of micromechanical capacitance accelerometers of a series (ADXLxxx) of the known American company Analog Devices. With their help the main dynamic metrological characteristics of the specified sensors are received. These are dynamic motion equations of accelerometers and their electrical analogs. Also in article the author describes the structural and topological equations of dynamic systems which were used for receiving electrical analogs. The equations consider the phenomenon of hypervalence interaction in dynamic systems. They are received by the author in the context of the developed theory of the generalized electrical circuit.

Keywords: accelerometer, electrical analog, mathematical model, differential equations, metrological performance, generalized electric circuit, topological structure, structural equations of an electric circuit, dynamical system, first and second generalized coordinate system

Передмова

Найпотаємніше зазвичай виявляє себе в неймовірному і тільки з часом, набувши статусу очевидного, знову приваблює до себе прихованими в очевидному та ще нерозпізнаними в неймовірному таємницями...

Нашого з вами буття. Коли з примусу, а коли – і за власним бажанням. Зазначене насамперед стосується тих, хто в пошуках істини самовіддано намагається йти шляхами найблагословеннішої мною України. Але, судячи з реалій, – дорогами тернистими і не завжди широкими, а часом – і не дорогами взагалі. Значно легше тому люду, хто на цих дорогах тупцює або чатує. Поодинці або зграями. Вони можуть не перейматися. Адже до раю в чергах не стоять. Додам ще, що – і до пекла теж. Бог з чортом (вибачте) в шахи не грає. З людьми – тим більше. Все найважливіше, що зрештою для таких людей ма-

ло б відбутися, з їхньої ж волі вже відбулося, навіть якщо більшість із них про це ще і не здогадується. І це на сьогодні – чи не єдине, що є очевидним...

Але зараз таки – про науку та інженерію. Що ж до іншого – нехай вже під кінець. Цих тез.

Вступ

Мікромеханічні акселерометри на сьогодні знаходять все більш широке застосування в системах вимірювання та контролю параметрів механічного руху, що є надзвичайно затребуваним в промисловості, енергетиці, на транспорті, сільському господарстві, будівництві тощо.

Сучасні технології обробки матеріалів надають можливість виготовляти акселерометри в інтегральному виконанні з надзвичайно малими габаритами та низькою собівартістю, що суттєво розширює область їхнього застосування.

З-поміж провідних компаній, які здійснюють розробку та виготовлення інтегральних акселерометрів, помітною є американська компанія Analog Devices. Її сімейству мікромеханічних ємнісних акселерометрів, наприклад, серії ADXL(ххх), порівняно з акселерометрами інших типів та компаній властиві істотні переваги.

Однак, як свідчить огляд супровідної технічної документації та наукової-технічної літератури, наприклад, [1-3], запропоновані та відомі математичні моделі акселерометрів є або доволі наближеними і неточними, або, подекуди, навіть і хибними. Враховуючи пов'язані з цим ймовірні ризики (наприклад, застосування заявлених сенсорів в системах моніторингу рівня вібрацій на турбінах гідроелектростанцій), наукові та інженерні задачі з удосконалення відомих та розробки більш точних математичних і електричних моделей акселерометрів є задачами важливими і актуальними.

Відтак основною метою цієї публікації є розробка диференціальних рівнянь руху акселерометрів серії ADXL(ххх) Analog Devices та їх уточнених електричних моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь виду

$$\sum_{k=1}^n a_k \frac{d^k y_{\text{eux}}}{dt^k} = \sum_{s=1}^m b_s \frac{d^s x_{\text{ex}}}{dt^s} \quad (1)$$

з визначенням їх порядку та коефіцієнтів.

1. Структурно-топологічні рівняння зосереджених динамічних систем на прикладі узагальненого електричного кола в першій та другій системах узагальнених координат

До розв'язування задачі уточнення математичних та електричних моделей заявлених акселерометрів автор долучився ще в далекому 2009 році, коли з'явилася необхідність практичної перевірки істотних елементів вихідного базису розроблюваної ним теорії узагальненого електричного кола, зокрема – його структурно-топологічних рівнянь, отриманих на основі рівнянь Лагранжа-Максвелла. Структурно-топологічні рівняння в першій системі узагальнених координат на той час мали вигляд

$$\left(L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + \frac{q_m}{C_m} \right) + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[L_{m,s_1} \frac{d}{dt} (i_m \pm i_{s_1}) + R_{m,s_1} (i_m \pm i_{s_1}) + \frac{q_m \pm q_{s_1}}{C_{m,s_1}} \right] = e_m, \quad m = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

а в другій –

$$\left(C_m \frac{du_m}{dt} + G_m u_m + \frac{\psi_m}{L_m} \right) + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[C_{m,s_1} \frac{d}{dt} (u_m \pm u_{s_1}) + G_{m,s_1} (u_m \pm u_{s_1}) + \frac{\psi_m \pm \psi_{s_1}}{L_{m,s_1}} \right] = J_m, \quad m = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

В 2015-16 рр. за результатами математичного дослідження рівнянь Лагранжа-Максвелла, які були застосовані в першій та другій системах узагальнених координат у відношенні узагальнених електричних кіл, та проведення порівняльного аналізу структур цих рівнянь на окремих відомих класах електричних кіл автором було виявлено існування гіперсили – незалежної багатовимірної взаємодії між структурно-топологічними елементами динамічних систем і, як наслідок, існування на той час ще невідомого фізичного явища – явища гіперсилової (гіпервалентної) взаємодії, що дозволило узагальнити і структурно-топологічні рівняння. В першій системі узагальнених координат вони набули вигляду

$$\left(L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + \frac{q_m}{C_m} \right) + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[L_{m,s_1} \frac{d}{dt} (i_m \pm i_{s_1}) + R_{m,s_1} (i_m \pm i_{s_1}) + \frac{q_m \pm q_{s_1}}{C_{m,s_1}} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^{n-1} \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^n \left[L_{m,s_1,s_2} \frac{d}{dt} (i_m \pm i_{s_1} \pm i_{s_2}) + R_{m,s_1,s_2} (i_m \pm i_{s_1} \pm i_{s_2}) + \frac{q_m \pm q_{s_1} \pm q_{s_2}}{C_{m,s_1,s_2}} \right] + \\
& + \dots + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^2 \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^3 \dots \sum_{\substack{s_{n-1}=s_{n-2}+1 \\ s_{n-1} \neq m}}^n \left[L_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}} \frac{d}{dt} (i_m \pm i_{s_1} \pm i_{s_2} \pm \dots \pm i_{s_{n-1}}) + \right. \\
& \left. + R_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}} (i_m \pm i_{s_1} \pm i_{s_2} \pm \dots \pm i_{s_{n-1}}) + \frac{q_m \pm q_{s_1} \pm q_{s_2} \pm \dots \pm q_{s_{n-1}}}{C_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}}} \right] = e_m, \quad m=1, 2, \dots, n,
\end{aligned} \tag{4}$$

а в другій –

$$\begin{aligned}
& \left(C_m \frac{d u_m}{dt} + G_m u_m + \frac{\psi_m}{L_m} \right) + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[C_{m,s_1} \frac{d}{dt} (u_m \pm u_{s_1}) + G_{m,s_1} (u_m \pm u_{s_1}) + \frac{\psi_m \pm \psi_{s_1}}{L_{m,s_1}} \right] + \\
& + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^{n-1} \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^n \left[C_{m,s_1,s_2} \frac{d}{dt} (u_m \pm u_{s_1} \pm u_{s_2}) + G_{m,s_1,s_2} (u_m \pm u_{s_1} \pm u_{s_2}) + \frac{\psi_m \pm \psi_{s_1} \pm \psi_{s_2}}{L_{m,s_1,s_2}} \right] + \\
& + \dots + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^2 \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^3 \dots \sum_{\substack{s_{n-1}=s_{n-2}+1 \\ s_{n-1} \neq m}}^n \left[C_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}} \frac{d}{dt} (u_m \pm u_{s_1} \pm u_{s_2} \pm \dots \pm u_{s_{n-1}}) + \right. \\
& \left. + G_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}} (u_m \pm u_{s_1} \pm u_{s_2} \pm \dots \pm u_{s_{n-1}}) + \frac{\psi_m \pm \psi_{s_1} \pm \psi_{s_2} \pm \dots \pm \psi_{s_{n-1}}}{L_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}}} \right] = J_m, \quad m=1, 2, \dots, n.
\end{aligned} \tag{5}$$

Відносно рівнянь структурно-топологічних рівнянь (4) і (5) рівняння (2) і (3) є їх окремим виявом у разі виключно *бінарної* силової взаємодії.

В 2020 р. автором зроблено новий крок в узагальненні диференціальних структурно-топологічних рівнянь зосереджених динамічних систем, який полягає у визначенні принципово нового типу фізичних сил, названих автором *субпотенціальними* та *надінерційними силами*, та припущенні можливого їх фізичного існування. За такої інтерпретації силової взаємодії структурно-топологічні рівняння в *першій системі* узагальнених координат набувають вигляду

$$\begin{aligned}
& \sum_{v=-\infty}^{+\infty} B_m^v \frac{d^v q_m}{dt^v} + \\
& + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} B_{m,s_1}^v \frac{d^v}{dt^v} (q_m \pm q_{s_1}) \right] + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^{n-1} \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} B_{m,s_1,s_2}^v \frac{d^v}{dt^v} (q_m \pm q_{s_1} \pm q_{s_2}) \right] + \\
& + \dots + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^2 \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^3 \dots \sum_{\substack{s_{n-1}=s_{n-2}+1 \\ s_{n-1} \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} B_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}}^v \frac{d^v}{dt^v} (q_m \pm q_{s_1} \pm q_{s_2} \pm \dots \pm q_{s_{n-1}}) \right] = e_m, \quad m=1, 2, \dots, n,
\end{aligned} \tag{6}$$

а в другій –

$$\begin{aligned}
& \sum_{v=-\infty}^{+\infty} D_m^v \frac{d^v \psi_m}{dt^v} + \\
& + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} D_{m,s_1}^v \frac{d^v}{dt^v} (\psi_m \pm \psi_{s_1}) \right] + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^{n-1} \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} D_{m,s_1,s_2}^v \frac{d^v}{dt^v} (\psi_m \pm \psi_{s_1} \pm \psi_{s_2}) \right] + \\
& + \dots + \sum_{\substack{s_1=1 \\ s_1 \neq m}}^2 \sum_{\substack{s_2=s_1+1 \\ s_2 \neq m}}^3 \dots \sum_{\substack{s_{n-1}=s_{n-2}+1 \\ s_{n-1} \neq m}}^n \left[\sum_{v=-\infty}^{+\infty} D_{m,s_1,s_2,\dots,s_{n-1}}^v \frac{d^v}{dt^v} (\psi_m \pm \psi_{s_1} \pm \psi_{s_2} \pm \dots \pm \psi_{s_{n-1}}) \right] = J_m, \quad m=1, 2, \dots, n.
\end{aligned} \tag{7}$$

Структурно-топологічні рівняння (6) та (7) зосереджених динамічних систем є математичною формою відображення нового фізичного принципу – *принципу субпотенціальної та надінерційної гіперси-*

лової взаємодії поміж структурно-топологічними елементами в динамічних системах не тільки електричної, але і, на думку автора, довільної фізичної природи.

Структурно-топологічні рівняння (6) і (7) здатні, і автор твердо переконаний в цьому, в індуктивний спосіб з позиції виявлених закономірностей в еволюційному русі електричних кіл, як динамічних систем, в гіперсиловому полі та власному фазовому просторі розв'язувати окремі задачі фундаментальної науки і знаходити відповідати на відвічні питання, пов'язані з природою сили, енергії, імпульсу, руху, простору та часу.

Отже, на сьогодні наведені узагальнені структурно-топологічні рівняння динамічних систем (6) і (7) мають найвищу логічну силу і дедуктивно підпорядковують собі всі інші форми структурно-топологічних рівнянь, водночас виявляючи себе в них за окремих умов.

Результати наукової роботи, пов'язаної із створенням авторської теорії узагальненого електричного кола і дослідженням фізичного явища гіперсилової (гіпервалентної) взаємодії в динамічних системах представлені численними науковими доповідями та публікаціями, наприклад, [4-8].

2. Уточнена електрична модель акселерометра

Отже, в цьому параграфі будуть наведені результати роботи, проведеної *особисто* автором в 2009 році і оприлюдненої в роботах [8-10]. Результати цієї роботи будуть взяті за основу в наступних параграфах під час побудови диференціального рівняння мікромеханічного акселерометра та його електричної моделі.

Конструкційна схема кожної з окремо узятих ланок сімейства мікромеханічних ємнісних акселерометрів серії ADXL(ххх) Analog Devices показана на рис. 1.

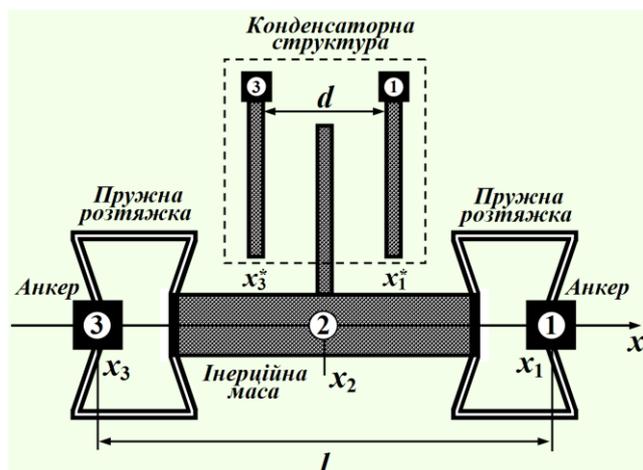


Рис. 1. Конструкційна схема окремої ланки акселерометра серії ADXL(ххх) Analog Devices

На рис. 2, а показано схему уточненої електричної моделі акселерометрів, яку було побудовано на основі диференціальних рівнянь руху динамічних систем із зосередженими параметрами – *структурних рівнянь*, отриманих автором на основі рівнянь Лагранжа-Максвела під час розробки та формування вихідного базису теорії *узагальненого електричного кола* [4].

В електричному колі схеми заміщення з урахуванням відповідних електричних та магнітних аналогій [11, 12] автор до уваги взяв найбільш вагомні фізичні явища механіки, які спостерігаються або можуть спостерігатися під час динамічного руху акселерометра і які пов'язані з фізичними процесами взаємоперетворення та перерозподілу різних форм механічної енергії поміж структурними типовими елементарними ланками динамічної системи.

До таких явищ були віднесені:

- перетворення частини кінетичної енергії T в інерційній масі m_2 (або частини магнітної енергії W_m в індуктивному елементі L_2 електричної моделі);
- перетворення частини потенціальної енергії Π в пружних розтяжках з коефіцієнтами жорсткості ζ_{12} , ζ_{23} (або частини електричної енергії W_e в ємнісних елементах C_{12} , C_{23});

- дисипація енергії у випадку деформації пружних розтяжок та руху інерційної маси, ввівши для цього коефіцієнти розсіювання β_{12} , β_{23} та β_2 (або розсіювання енергії електричного струму на активних опорах R_{12} , R_{23} електричної моделі, в одному випадку, та на активному опорі R_2 – в іншому);

- перетворення частини кінетичної енергії T датчика за рахунок руху анкерів m_1 і m_3 та руху обох пружних розтяжок m_{12} , m_{23} під час їх деформації (або частини магнітної енергії W_m в індуктивних елементах, в одному випадку, L_1 і L_3 , а в іншому – L_{12} , L_{23} електричної моделі),

а також:

- дію постійної зовнішньої сили земного тяжіння у випадку розташування датчика під кутом α до горизонту $F_2 = m_2 g \sin \alpha$ (або дію постійного зовнішнього джерела е.р.с. E_2 в другому незалежному контурі електричної моделі);

- дію змінної у часі зовнішньої сили F_1 , прикладеної до корпусу акселерометра, яка і викликає зміну його швидкості (або дію зовнішніх джерел змінної е.р.с. $e_1 = e_3$ в першому та третьому контурах відповідно).

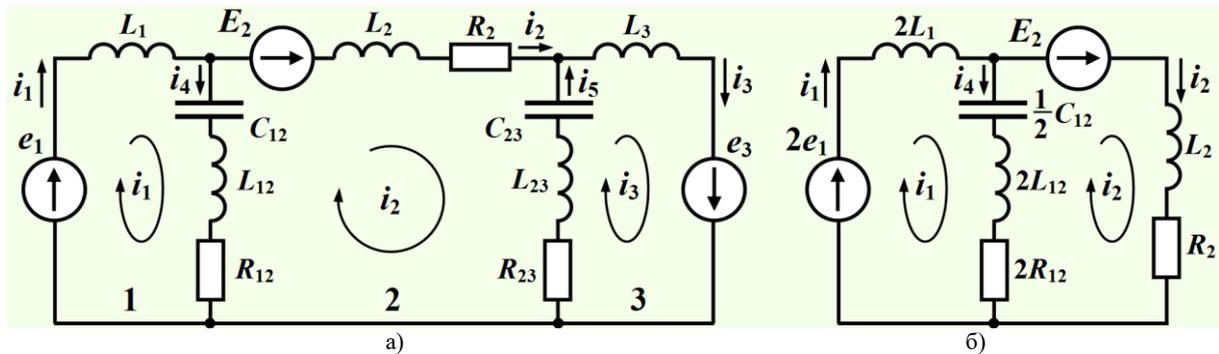


Рис. 2. Схема електричної моделі окремої ланки акселерометра

Водночас під час аналізу системи рівнянь, складених для даного кола (див. рис. 2, а) за законами Кірхгофа, автором було помічено, що система рівнянь може бути суттєво спрощена, якщо врахувати в'язь, яка існує поміж ланками механічної системи акселерометра, а саме $x_1 - x_3 = const$, звідки $\dot{x}_1 = \dot{x}_3$. Електричним аналогом цієї в'язі є умова: $i_1 = i_3$, за виконання якої система диференціальних рівнянь, складена за законами Кірхгофа, набуває вигляду:

$$\begin{cases} -i_1 + i_2 + i_4 = 0, \\ 2L_1 \frac{di_1}{dt} + u_{C_{12}} + 2L_{12} \frac{di_4}{dt} + 2R_{12}i_4 = 2e_1, \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2i_2 - 2R_{12}i_4 - 2L_{12} \frac{di_4}{dt} - u_{C_{12}} = E_2, \\ i_4 = \frac{C_{12}}{2} \frac{du_{C_{12}}}{dt}, \end{cases} \quad (8)$$

у зв'язку з чим і електрична модель зазнає помітних еквівалентних спрощень, утворюючи систему з двома ступенями вільності. Електричне коло такої еквівалентної системи показано на рис. 2, б.

В системі (8) рівняння записано за припущення ідентичності фізичних властивостей як обох анкерів, так і обох пружних розтяжок, закріплених на них, а також тієї обставини, що зовнішня сила F_1 , яка діє на датчик, прикладається і до першого анкера, і до другого водночас.

Також надалі будемо вважати, що акселерометр розташований в горизонтальній площині, відтак е.р.с. E_2 в другому незалежному контурі електричної моделі буде дорівнювати нулю $E_2 = 0$.

3. Побудова диференціального рівняння електричної моделі акселерометра

Диференціальне рівняння електричної моделі заявленого акселерометра отримаємо на основі електричного кола, показаного на рис. 2, б.

Відповідно до *методу контурних струмів* для зазначеного електричного кола запишемо систему рівнянь, складену відносно контурних струмів i_1 та i_2 :

$$\begin{cases} 2(L_1 + L_{12})\frac{di_1}{dt} + 2R_{12}i_1 + \frac{2}{C_{12}}\int i_1 dt - 2L_{12}\frac{di_2}{dt} - 2R_{12}i_2 - \frac{2}{C_{12}}\int i_2 dt = 2e_1, \\ -2L_{12}\frac{di_1}{dt} - 2R_{12}i_1 - \frac{2}{C_{12}}\int i_1 dt + (L_2 + 2L_{12})\frac{di_2}{dt} + (R_2 + 2R_{12})i_2 + \frac{2}{C_{12}}\int i_2 dt = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Для спрощення процедури наступних алгебраїчних перетворень скористаємося методом, запропонованим геніальним О. Хевісайдом, увівши в систему (9) інтегро-диференціальний оператор

$$\mathbf{D}^k = \begin{cases} \frac{d^k}{dt^k}, & k \geq 0, \\ \underbrace{\int \dots \int}_{|k|} dt, & k < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Отже, формально перепишемо (9) з урахуванням (10)

$$\begin{cases} [(L_1 + L_{12})\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}]i_1 - [L_{12}\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}]i_2 = e_1, \\ -2[L_{12}\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}]i_1 + [(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D} + (R_2 + 2R_{12}) + 2C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}]i_2 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для подальшої роботи визначимо *вхідні* та *вихідні* фізичні величини як акселерометра, так і його електричного аналога.

Система мікромеханічного акселерометра є системою з чітко ідентифікованими входом та виходом, позаяк в ній спостерігається реалізація метрологічної операції первинного перетворення (відображення) вхідної фізичної величини у вихідну.

За причинно-наслідковим зв'язком вхідною фізичною величиною є *механічне прискорення* (анкерів акселерометра), тобто $a_1 = \frac{d^2x_1}{dt^2}$, а вихідною – *механічне зміщення* x_2 його інерційної маси, відтак

– середньої пластини в конденсаторі, з якою ця маса жорстко зв'язана (див. рис. 1).

Водночас, варто зазначити, що з математичної точки зору в диференціальному рівнянні, сформованому з метою побудови та розв'язування у той чи інший спосіб задачі Коші, невідомою функцією, відтак – вихідною фізичною величиною, має бути перетворювана (вимірювана) фізична величина, в нашому випадку – механічне прискорення, а відомою (вхідною) – механічне зміщення, тобто статус – протилежний вищезазначеному.

Однак, оскільки в метрології *диференціальне рівняння* засобу вимірювального перетворювача визначено на засадах першого підходу [13], надалі за основу візьмемо саме його (рис. 3).

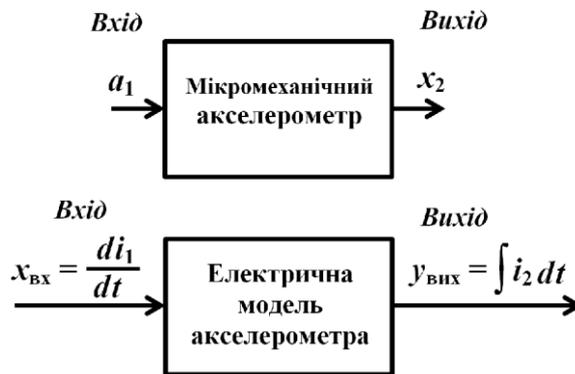


Рис. 3. Ідентифікація вхідних та вихідних фізичних величин

Відповідно до *теорії електродинамічних аналогій* в системі аналогій типу “*сила-напруга*” (*перша система* електродинамічних аналогій) аналогією до механічного зміщення є *контурний заряд*, а аналогією до механічного прискорення – *похідна контурного струму* за часом. Оскільки уточнені електричні моделі акселерометра, які показано на рис. 2, побудовано саме в першій системі електродина-

мічних аналогій, аналогом вхідної фізичної величини буде *похідна першого контурного струму* $x_{\text{ex}} = \frac{di_1}{dt}$, а вихідної – *інтеграл другого контурного струму* $y_{\text{вix}} = \int i_2 dt$, в обох випадках – за часом.

З урахуванням інтегро-диференціального оператора (10) для струму i_1 запишемо

$$i_1 = \int x_{\text{ex}} dt = \mathbf{D}^{-1} x_{\text{ex}}, \quad (12)$$

а для струму i_2 –

$$i_2 = \frac{dy_{\text{вix}}}{dt} = \mathbf{D} y_{\text{вix}}. \quad (13)$$

Підставляємо (12) та (13) в систему рівнянь (11).

Отримуємо

$$\begin{cases} [(L_1 + L_{12})\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}] \mathbf{D}^{-1} x_{\text{ex}} - [L_{12}\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}] \mathbf{D} y_{\text{вix}} = e_1, \\ -2[L_{12}\mathbf{D} + R_{12} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}] \mathbf{D}^{-1} x_{\text{ex}} + [(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D} + (R_2 + 2R_{12}) + 2C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-1}] \mathbf{D} y_{\text{вix}} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Формально система інтегро-диференціальних рівнянь (14) має структуру лінійних алгебраїчних рівнянь, складену відносно вхідної x_{ex} та вихідної $y_{\text{вix}}$ електричних фізичних величин.

Переписуємо (14) в матричній формі

$$\begin{pmatrix} [(L_1 + L_{12}) + R_{12}\mathbf{D}^{-1} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-2}] & -[L_{12}\mathbf{D}^2 + R_{12}\mathbf{D} + C_{12}^{-1}] \\ -2[L_{12} + R_{12}\mathbf{D}^{-1} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-2}] & [(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D}^2 + (R_2 + 2R_{12})\mathbf{D} + 2C_{12}^{-1}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{ex}} \\ y_{\text{вix}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

і застосуємо до неї правило Крамера:

$$x_{\text{ex}} = \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad y_{\text{вix}} = \frac{\Delta_y}{\Delta} \quad (16)$$

з визначниками

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} e_1 & -[L_{12}\mathbf{D}^2 + R_{12}\mathbf{D} + C_{12}^{-1}] \\ 0 & [(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D}^2 + (R_2 + 2R_{12})\mathbf{D} + 2C_{12}^{-1}] \end{vmatrix} = [(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D}^2 + (R_2 + 2R_{12})\mathbf{D} + 2C_{12}^{-1}] e_1 \quad (17)$$

та

$$\begin{aligned} \Delta_y &= \begin{vmatrix} [(L_1 + L_{12}) + R_{12}\mathbf{D}^{-1} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-2}] & e_1 \\ -2[L_{12} + R_{12}\mathbf{D}^{-1} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-2}] & 0 \end{vmatrix} = 2[L_{12} + R_{12}\mathbf{D}^{-1} + C_{12}^{-1}\mathbf{D}^{-2}] e_1 = \\ &= 2 \frac{[L_{12}\mathbf{D}^2 + R_{12}\mathbf{D} + C_{12}^{-1}]}{\mathbf{D}^2} e_1. \end{aligned} \quad (18)$$

З рівнянь (16) випливає, що

$$\Delta_x y_{\text{вix}} = \Delta_y x_{\text{ex}}, \quad (19)$$

а з урахуванням (17), (18) та (19) –

$$[(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D}^2 + (R_2 + 2R_{12})\mathbf{D} + 2C_{12}^{-1}] y_{\text{вix}} = 2 \frac{[L_{12}\mathbf{D}^2 + R_{12}\mathbf{D} + C_{12}^{-1}]}{\mathbf{D}^2} x_{\text{ex}}, \quad (20)$$

або

$$[(L_2 + 2L_{12})\mathbf{D}^4 + (R_2 + 2R_{12})\mathbf{D}^3 + 2C_{12}^{-1}\mathbf{D}^2] y_{\text{вix}} = 2[L_{12}\mathbf{D}^2 + R_{12}\mathbf{D} + C_{12}^{-1}] x_{\text{ex}}. \quad (21)$$

В рівнянні (21) проводимо формальну заміну інтегро-диференціального оператора \mathbf{D}^k (10) на операцію диференціювання $\frac{d^k}{dt^k}$ і для уточненої електричної моделі-аналога мікромеханічних акселерометрів серії ADXL(ххх) Analog Devices остаточно отримуємо

$$(L_2 + 2L_{12}) \frac{d^4 y_{\text{вix}}}{dt^4} + (R_2 + 2R_{12}) \frac{d^3 y_{\text{вix}}}{dt^3} + \frac{2}{C_{12}} \frac{d^2 y_{\text{вix}}}{dt^2} = 2L_{12} \frac{d^2 x_{\text{ex}}}{dt^2} + 2R_{12} \frac{d x_{\text{ex}}}{dt} + \frac{2}{C_{12}} x_{\text{ex}}. \quad (22)$$

4. Диференціальне рівняння акселерометрів серії ADXL(ххх) Analog Devices

Диференціальне рівняння досліджуваних акселерометрів запишемо, скориставшись теорією електродинамічних аналогій [4-10] на основі отриманої автором в роботах [8, 9] уточненої електричної моделі, схему якої відтворено в другому параграфі (див. рис. 2, а і б), та диференціального рівняння руху (22) електричної моделі, розробленого в третьому параграфі цих тез.

Як було зазначено вище (див. рис. 3), вхідною фізичною величиною відносно акселерометра є механічне прискорення (анкерів), тобто $a_1 = \frac{d^2 x_1}{dt^2}$, а вихідною – механічне зміщення x_2 інерційної маси та її середньої пластини (див. рис. 1), з положенням якої функціонально пов'язана електрична ємність [8, 9] мікромеханічного ємнісного акселерометра.

Тоді, відповідно до першої системи електродинамічних аналогій [8] диференціальним рівнянням заявлених акселерометрів, які через режим малого сигналу наразі розглядаються як лінеаризовані динамічні системи, буде звичайне лінійне диференціальне рівняння

$$(m_2 + 2m_{12}) \frac{d^4 x_2}{dt^4} + (\beta_2 + 2\beta_{12}) \frac{d^3 x_2}{dt^3} + \zeta_{12} \frac{d^2 x_2}{dt^2} = 2m_{12} \frac{d^2 a_1}{dt^2} + 2\beta_{12} \frac{d a_1}{dt} + 2\zeta_{12} a_1, \quad (17)$$

яке автором використане для розрахунку інших динамічних метрологічних характеристик досліджуваних акселерометрів, а саме перехідної та імпульсної характеристик, передатних функцій за Лапласом та Фур'є, АЧХ, ФЧХ тощо.

5. Інше

А тепер про неприємне. На превеликий жаль.

На рис. 4 показана обкладинка наукової роботи (монографії) інших авторів (з сайту ВНТУ), яка вийшла друком в 2019 р. [14].

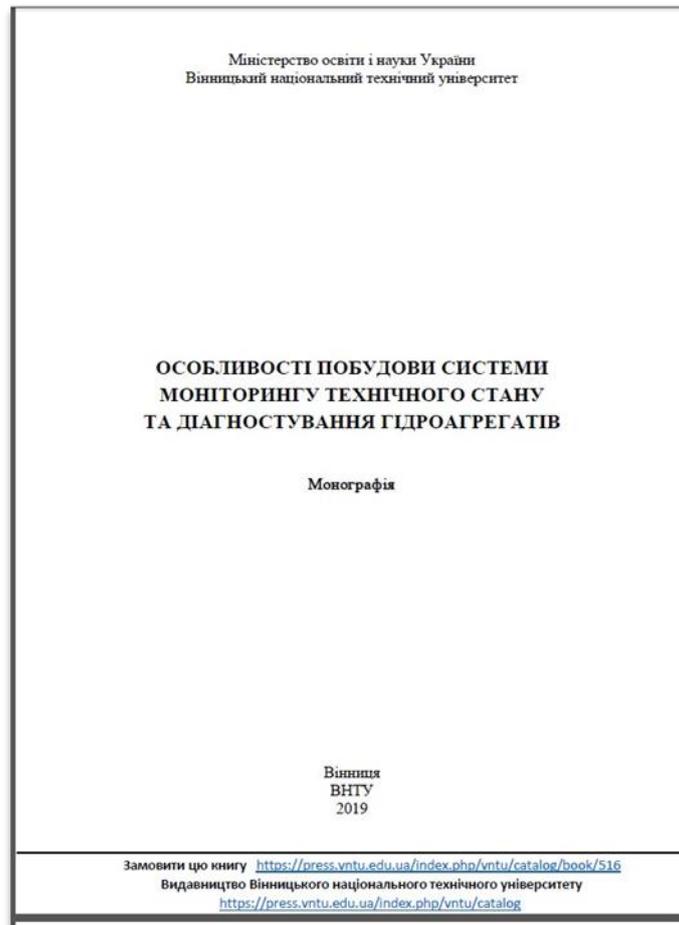


Рис. 4. Монографія (2019 р.)

В монографії з-поміж іншого окремим підрозділом (п. 2.1) представлено матеріали, які стосуються уточнення математичних та електричних моделей мікромеханічних ємнісних акселерометрів серії ADXL(ххх) Analog Devices.

Як було зазначено вище, уточнені математична та електрична моделі заявлених акселерометрів були розроблені *автором цих тез* особисто ще в 2009 р. [8, 9, 10] на основі на той час вже частково побудованого ним вихідного базису авторської теорії узагальненого електричного кола.

Автор сподівався побачити в зазначеній монографії розвиток або, можливо, заперечення своїх ідей. Натомість побачив ті ж самі матеріали, які ним були розроблені та написані в тому ж 2009 р. Навіть текст дослівний (рис. 5). Але вже без автора...

Вступ

Мікромеханічні акселерометри на сьогодні знаходять все більш широке застосування в техніці [1-4]. Сучасні технології обробки матеріалів дозволяють виготовляти акселерометри в інтегральному виконанні з надзвичайно малими габаритами та низькою собівартістю, що суттєво розширює область їхнього застосування. В першу чергу це стосується енергетики, транспорту, медицини, промислових систем вимірювання та контролю, систем навігації тощо.

Однак, як свідчить аналітичний огляд супровідної технічної документації та наукової-технічної літератури [1-3], запропоновані математичні моделі, які описують даний різновид акселерометрів, є або доволі наближеними і неточними, або за певних умов навіть і хибними.

Враховуючи пов'язані з цим ймовірні негативні наслідки, які можуть статися під час функціонування складних і, головне, критичних до цього систем (наприклад, при моніторингу рівня вібрацій на турбінах гідроелектростанцій), наразі постає важлива і актуальна задача розробки більш точних математичних моделей означених акселерометрів (з огляду на їх перспективність). Тому основною метою даної роботи і має стати розв'язання цієї задачі з наступним аналізом отриманих результатів.

а) Авторський текст (2009 р.)

2.1.1 Математичні та електричні моделі мікромеханічного ємнісного акселерометра

Мікромеханічні акселерометри на сьогодні знаходять все більш широке застосування у вимірювальній техніці [11-14]. Сучасні нанотехнології обробки матеріалів дозволяють виготовляти акселерометри в інтегральному виконанні з надзвичайно малими габаритами та низькою собівартістю, що суттєво розширює область їхнього застосування. В першу чергу це стосується енергетики, транспорту, медицини, промислових систем вимірювання та контролю, систем навігації тощо.

Однак, як свідчить аналітичний огляд супровідної технічної документації та науково-технічної літератури [11, 12, 14], запропоновані вище математичні моделі, які описують цей різновид акселерометрів, є або доволі наближеними і неточними, або за певних умов навіть і

17

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/516>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

б) Текст з монографії 2019 р. (без посилання на автора)

Розробка уточненої математичної та електричної моделей

Серед провідних компаній сьогодення, які здійснюють розробку та виробництво інтегральних акселерометрів, доволі помітною є Analog Devices [2]. В даний час ця компанія виготовляє

сімейство мікромеханічних ємнісних акселерометрів ADXLxxx поверхневої конструкції, які мають переваги над акселерометрами інших типів.

Уточнену математичну модель розробимо на основі акселерометра ADXL50. Кожна із 54 однакових ланок цього датчика являє собою сукупність штучної наперед відомої інерційної маси, яка з двох кінців через пружні розтяжки спирається на стовпчики-анкери, та диференціальної конденсаторної структури з повітряним діелектриком (рис. 1), електрична ємність якої зазнає змін, коли інерційна маса датчика прискорення за зміни швидкості переміщення кристала і сама зміщується

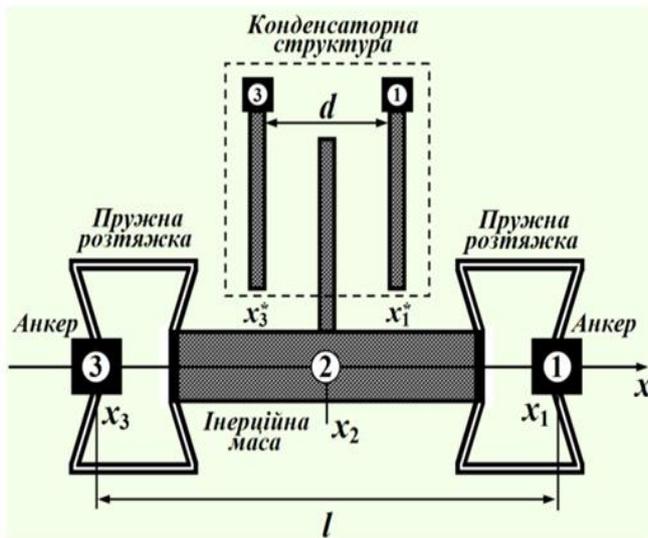


Рис. 1. Схема окремої ланки акселерометра

г) Авторський текст (2009 р.)

сукупність штучної наперед відомої інерційної маси, яка з двох кінців через пружні розтяжки опирається на стовпчики-анкери, та диференціальної конденсаторної структури з повітряним діелектриком (рис. 2.2), електрична ємність якої зазнає змін, коли інерційна маса датчика прискорення за зміни швидкості переміщення кристала і сама зміщується відносно нього.

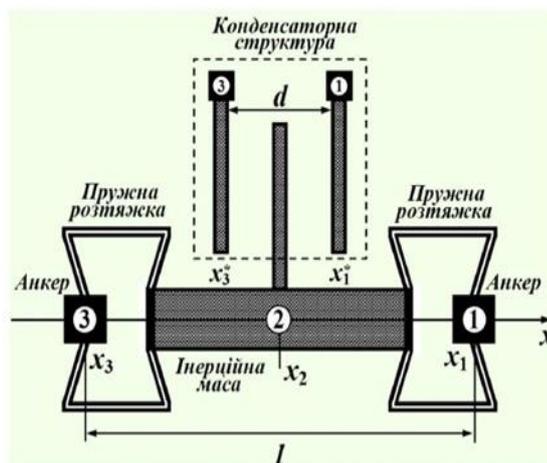


Рисунок 2.2 – Схема окремої ланки акселерометра

в) Текст з монографії 2019 р. (без посилання на автора)

Як видно з рис. 1, в загальному випадку кількість ступенів вільності елементарної ланки датчика як механічної системи дорівнює трьом. Однак через існуючу в'язь між анкерами, відстань між якими є постійною, це число можна звести до двох. Розглянемо це докладніше.

Для побудови уточненої математичної моделі скористаємося теорією Лагранжа [5] та теорією динамічних аналогій (методом електромеханічних аналогій) [6, 7].

Відповідно до першої теорії, рівняннями руху елементарної ланки будуть рівняння Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right] = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial x_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де Π є потенціальною енергією елементарної ланки, Φ – її дисипативною функцією Релея. В рівняннях (1) враховано ту обставину, що кінетична енергія T даної системи залежить від узагальнених швидкостей обох анкерів (\dot{x}_1, \dot{x}_3) та інерційної маси \dot{x}_2 і не залежить від їхніх узагальнених координат x_1, x_2, x_3 , тобто

$$\frac{\partial T}{\partial x_s} = 0, \quad s = 1, 2, 3.$$

Це дозволяє скористатися першою системою динамічних аналогій (аналогій типу «сила-напруга») [6] і поставити у відповідність системі диференціальних рівнянь (1) як аналогію рів-

г) Авторський текст (2009 р.)

З рис. 2.2 видно, що в загальному випадку кількість ступенів вільності елементарної ланки сенсора як механічної системи дорівнює трьом. Але через існуючу в'язь між анкерами, відстань між якими є постійною, це число можна звести до двох. Розглянемо це докладніше.

2.1.1.1 Уточнені математична та електрична моделі мікро-механічного ємнісного акселерометра

Для побудови уточненої математичної моделі скористаємося теорією Лагранжа [15] та теорією динамічних аналогій (методом електромеханічних аналогій) [16, 17].

Відповідно до першої теорії, рівняннями руху елементарної ланки є рівняння Лагранжа II роду [18]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right] = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial x_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (2.4)$$

де Π – потенціальна енергія елементарної ланки; Φ – дисипативна функція Релея елементарної ланки.

В рівняннях (2.4) враховано ту обставину, що кінетична енергія T

д) Текст з монографії 2019 р. (без посилання на автора)

де Π є потенціальною енергією елементарної ланки, Φ – її дисипативною функцією Релея. В рівняннях (1) враховано ту обставину, що кінетична енергія T даної системи залежить від узагальнених швидкостей обох анкерів (\dot{x}_1, \dot{x}_3) та інерційної маси \dot{x}_2 і не залежить від їхніх узагальнених координат x_1, x_2, x_3 , тобто

$$\frac{\partial T}{\partial x_s} = 0, \quad s = 1, 2, 3.$$

Це дозволяє скористатися першою системою динамічних аналогій (аналогій типу «сила-напруга») [6] і поставити у відповідність системі диференціальних рівнянь (1) як аналогію рівняння Лагранжа-Максвелла

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial W_m}{\partial \dot{i}_s} \right] = e_s - \frac{\partial W_e}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \dot{i}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де W_m – енергія магнітного поля *електричної моделі* елементарної ланки акселерометра, W_e – енергія її електричного поля, Φ_e – електрична дисипативна функція Релея, e_s – контурні електрорушійні сили, $i_s = \dot{q}_s$ – контурні струми електричної моделі.

Електричну схему моделі (2) побудуємо на основі загальних схем з довільним ступенем вільності, які були запропоновані в роботі [7], попередньо провівши при цьому лінеаризацію ме-

е) Авторський текст (2009 р.)

В рівняннях (2.4) враховано ту обставину, що кінетична енергія T цієї системи залежить від узагальнених швидкостей обох анкерів (\dot{x}_1, \dot{x}_3) та інерційної маси \dot{x}_2 і не залежить від їхніх узагальнених координат x_1, x_2, x_3 , тобто

$$\frac{\partial T}{\partial x_s} = 0, \quad s = 1, 2, 3.$$

Це дозволяє скористатися першою системою динамічних аналогій (аналогій типу «сила-напруга») [16] і поставити у відповідність системі диференціальних рівнянь (2.5) як аналогію рівняння Лагранжа-Максвелла

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial W_m}{\partial \dot{i}_s} \right] = e_s - \frac{\partial W_e}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \dot{i}_s}, \quad s = 1, 2, 3, \quad (2.5)$$

де W_m – енергія магнітного поля електричної моделі елементарної ланки акселерометра; W_e – енергія її електричного поля; Φ_e – електрична дисипативна функція Релея; e_s – контурні електрорушійні сили; $i_s = \dot{q}_s$ – контурні струми електричної моделі.

е) Текст з монографії 2019 р. (без посилання на автора)

Електричну схему моделі (2) побудуємо на основі загальних схем з довільним ступенем вільності, які були запропоновані в роботі [7], попередньо провівши при цьому лінеаризацію механічної системи елементарної ланки акселерометра. Наразі необхідно зауважити, що вищезначена лінеаризація є цілком допустимою, через слабку нелінійність в робочій області значень узагальнених координат та узагальнених швидкостей.

Розроблену схему електричної моделі наведено на рис. 2, а.

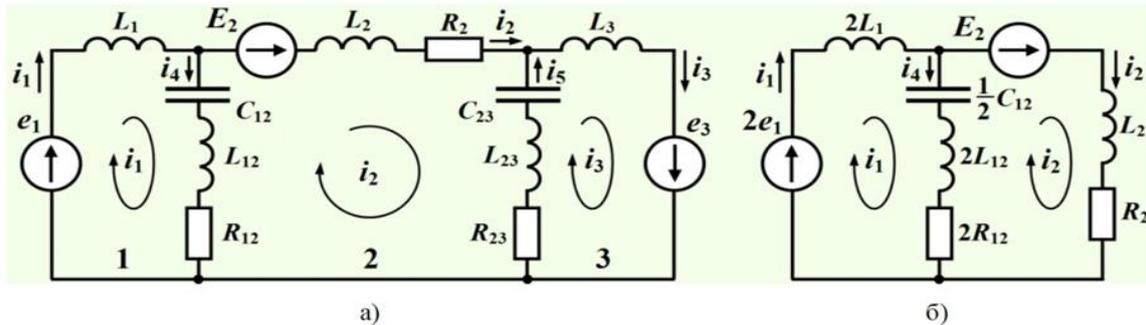


Рис. 2. Схема електричної моделі окремої ланки акселерометра

7. Ведміцький Ю. Г. Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №4(113). – С. 47-55.

ж) Авторський текст (2009 р.)

Електричну схему моделі (2.5) побудуємо на основі загальних схем з довільним ступенем вільності, які були запропоновані в роботі [17], попередньо провівши при цьому лінеаризацію механічної системи елементарної ланки акселерометра. Необхідно зауважити, що вищезначена лінеаризація є цілком припустимою, через слабку нелінійність в робочій області значень узагальнених координат та узагальнених швидкостей.

Схему заміщення електричної моделі наведено на рис. 2.3а [19].

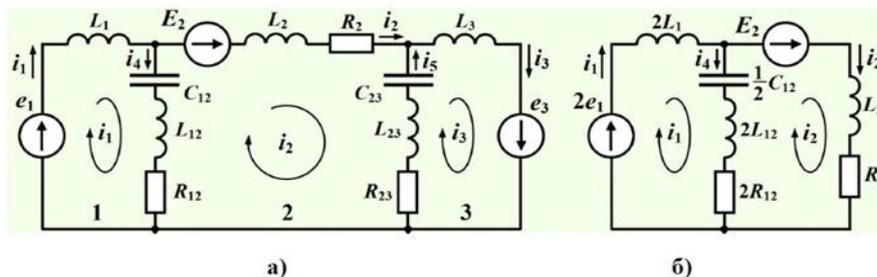


Рисунок 2.3 – Схема електричної моделі окремої ланки акселерометра

з) Текст з монографії 2019 р., де (нарешті!) є начебто посилання на автора [19]. Хто ж автор?

19. Микропроцессорный регистратор быстропротекающих процессов / В. Т. Маликов, В. А. Поджаренко, В. В. Кухарчук и др. // Радиоизмерения. – 1985. – Т.3. – С. 104–111.

и) ???

Рис. 5. До питання добротності

Варто зазначити, що з подібним автор стикається далеко не вперше [15, 16].

Висновки

В роботі викладені окремі основні положення авторської теорії узагальненого електричного кола і отримано диференціальні рівняння мікромеханічних ємнісних акселерометрів серії ADXL(xxx) американської компанії Analog Devices. Результати мають важливе як спеціально-технічне, так і загально-методологічне значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фрайден Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с. – ISBN 5-94836-050-4.
2. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под. ред. Б. С. Алешина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с. – ISBN 5-9221-0735-6.
3. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х кн. Кн. 1. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон [та ін.]. – М.: Мир, 1992. – 480 с. – ISBN 5-03-001641-4.
4. Ведміцький Ю. Г. Узагальнені електричні схеми-аналоги неперервних динамічних систем довільного порядку / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. — 2010. — Випуск 2. — С. 63-69.
5. Ведміцький Ю. Г. Узагальнене електричне коло і фізичне явище гіпервалентної взаємодії / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. — 2016. — Випуск 4. — С. 207-213.
6. Ведміцький Ю. Г. Узагальнене електричне коло з урахуванням фізичного явища гіпервалентної взаємодії / Ю. Г. Ведміцький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. — №2(58). — 2017. — С. 29-36.
7. Ведміцький Ю. Г. Тектологія динамічних систем і явище гіперсилової взаємодії в структурних рівняннях узагальненого електричного кола / Ю. Г. Ведміцький // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2018. – №2. – С. 1-11. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/547/532>.
8. Ведміцький Ю. Г. Контроль моменту інерції на основі удосконаленої теорії електродинамічних аналогій : монографія / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 196 с.
9. Уточнені математична та електрична моделі мікромеханічних ємнісних акселерометрів / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Г. Мадьяров // Вісник Інженерної академії України. — 2009. — Випуск 2. — С. 121-125.
10. Ведміцький Ю. Г. Контроль моменту інерції електротехнічних комплексів та систем на основі удосконаленої теорії електродинамічних аналогій / Ю. Г. Ведміцький. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – 2013. – 22 с.
11. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме : в 2 т. / Дж. К. Максвелл. — М. : Наука, 1989 — . — Т. 1. — 417 с.; Т. 2. — 437 с.
12. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. — Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. — 392 с.
13. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 522 с.
14. Особливості побудови системи моніторингу технічного стану та діагностування гідроагрегатів : монографія / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк, С. Ш. Кацив, В. Г. Мадьяров. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 91 с.
15. Теоретичні основи електротехніки. Методи розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл в прикладах та задачах / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 262 с.
16. Карпов Е. А. Теоретические основы электротехники. Основы нелинейной электротехники в упражнениях и задачах / Е. А. Карпов, В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 184 с.

Юрій Григорович Ведміцький — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, ВНТУ, м. Вінниця, wjg@ukr.net

Yurii G. Vedmitskyi — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, wjg@ukr.net