

## РОЗРОБЛЕННЯ VHDL-AMS МОДЕЛІ МІКРОМЕХАНІЧНОГО Z-ОСЬОВОГО ГІРОСКОПА НА КАРДАННОМУ ПІДВІСІ ДЛЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ПРОЕКТУВАННЯ

© Головатий А., 2008

**Створено модель для автоматизованого проектування мікромеханічного z-осьового гіроскопа на карданному підвісі засобами VHDL-AMS, що дає змогу моделювати робочі та вимірювальні коливання гіроскопа, зміну струмів, вихідну напругу, чутливість пристрою до прикладеної кутової швидкості, а також аналізувати роботу цього пристрою на схемотехнічному рівні автоматизованого проектування.**

**The model for computer-aided design of micromechanical z-axis gimbal gyroscope is created using VHDL-AMS. The created model allows to model drive and sense vibrations of the gyroscope, variations of currents, output voltage, sensitivity of the device depending on the applied angular rate, and also to make the functioning analysis of this device on the schematic level of computer-aided design.**

### Вступ

Гіроскопами називаються пристрої для вимірювання кутової швидкості. Розвиток технологій мікроелектроніки дає змогу створювати якісно нові гіроскопи – мікромеханічні. Особливістю таких пристроїв є те, що на одному напівпровідниковому кристалі виготовляють як схему керування і вимірювання, так і механічні рухомі елементи [1–3].

Сучасні мікромеханічні гіроскопи мають переваги порівняно з традиційними електромеханічними, серед них: малі габарити, мала собівартість, мале енергоспоживання. Мікромеханічні гіроскопи доволі широко застосовуються в: автомобільній промисловості, робототехніці, медицині, системах навігації і стабілізації рухомих платформ, комп'ютерній промисловості, але точність і діапазон вимірювання обмежують сфери їх застосування. Тому покращання технічних характеристик МЕМС гіроскопів – таких, як збільшення чутливості, розширення діапазону вимірювання є актуальним питанням сьогодення.

Мікромеханічний (МЕМС) гіроскоп є одним із найскладніших пристроїв, що виготовляються за сучасними МЕМС технологіями.

Потреба в МЕМС гіроскопах зростає. За оцінками експертів, обсяги продажу таких пристроїв до 2010 року можуть досягти 800 млн. доларів.

Залежно від сфери застосування виробники проектують МЕМС гіроскопи з різними достатніми технічними характеристиками.

Одним із найважливіших етапів розроблення МЕМС пристрою є його математичне моделювання. Сьогодні на ринку ПЗ існує велика кількість програмних пакетів числового моделювання інтегральних пристроїв і технологічних процесів. Існуючі універсальні програмні засоби найчастіше представляють середовища з широким набором функцій для розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь та графічним відображенням отриманих результатів. Із застосуванням таких універсальних програм можна ефективно розв'язувати науково-дослідні задачі, але ці засоби не завжди зручні в процесі проектування, коли необхідно отримати розв'язок з необхідною точністю за доволі короткий проміжок часу.

Оскільки для проектування МЕМС гіроскопів потрібне володіти інформацією з таких фізичних областей знань, як електроніка, механіка, електростатика, термодинаміка, їх повний статичний

та динамічний аналіз є дуже складний. Практичний шлях – це одержання спрощених моделей для механічних елементів з подальшим використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Наприклад, такого як: MAST/SABER, NODAS, Cadence, hAMSter (VHDL-AMS) та ін.

Розширення стандарту VHDL (VHDL-AMS – Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language Analog-Mixed Signals), призначеного для опису і моделювання як цифрових, так і аналогових приладів, де використовують не тільки електричні, а й оптичні, хімічні, механічні та ін. сигнали, є важливим кроком на шляху створення універсальних САПР VIC/MEMC, що дасть змогу здійснювати автоматичну компіляцію топологічних рішень на основі високорівневих текстових описів. Сьогодні створено і постійно розвиваються САПР, що підтримують стандарт VHDL-AMS. Однією з таких систем є програма hAMSter, що дає змогу моделювати сенсорні і актюаторні елементи мікросистемної техніки, використовуючи VHDL-AMS.

У цій роботі засобами VHDL-AMS створено модель мікромеханічного z-осьового гіроскопа на карданному підвісі для моделювання його механічних елементів.

### 1. Конструкція та принцип роботи мікроелектромеханічного z-осьового гіроскопа на карданному підвісі

Конструкцію мікромеханічного z-осьового карданного гіроскопа зображено на рис. 1 [4].

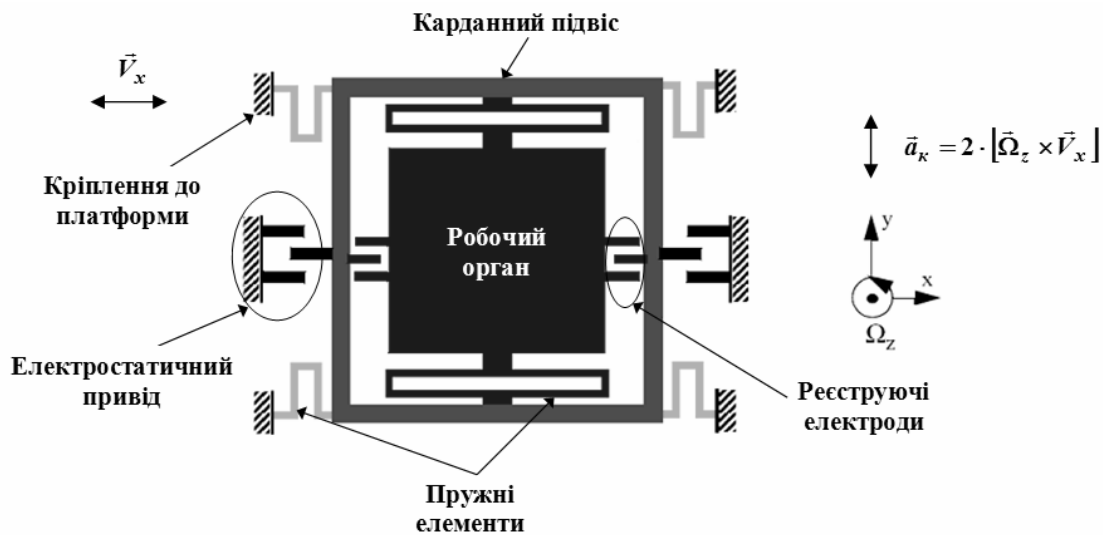


Рис. 1. Спрощений вигляд конструкції MEMC z-осьового гіроскопа на карданному підвісі

В основу роботи вібраційного гіроскопа покладено Коріолісове прискорення  $a_k$ , яке є пропорційним швидкості  $\vec{V}_x$  вібраційної структури (робочий орган і карданний підвіс) і зовнішній кутовій швидкості  $\vec{\Omega}_z$ :

$$\vec{a}_k = 2 \cdot [\vec{\Omega}_z \times \vec{V}_x] \quad (1)$$

Вібраційна структура приводиться в режим поступальних коливань вздовж осі  $x$  за допомогою електростатичних приводів. Вібраційна структура сконструйована так, що робочий орган рухається вздовж осі  $y$ . Під час обертання платформи, на якій встановлено гіроскоп, відносно осі чутливості приладу (осі вимірювання  $z$ ) з кутовою швидкістю  $\vec{\Omega}_z$  виникає Коріолісова сила. Сила Коріоліса змінюється з частотою вимушених коливань, а її модуль пропорційний кутовій швидкості вимірювання,  $\vec{\Omega}_z$ . Коріолісова сила збуджує поступальні коливання робочого органа вздовж осі  $y$ . Ці поступальні коливання робочого органа є мірою вхідної кутової швидкості обертання платформи. Зміщення робочого органа від Коріолісового прискорення вимірюється мікроакселерометром, утвореним робочим органом, пружними елементами і реєструючими електродами. За рівнянням (1) Коріолісова сила діє на робочий орган вздовж осі  $y$  за наявності

обертання відносно осі  $z$ . Зміщення робочого органа є пропорційне кутовій швидкості  $\bar{\Omega}_z$ . Реєструючі електроди утворюють диференційний конденсатор. Змінна відстані між реєструючими електродами під час коливань робочого органа вздовж осі  $y$ , спричинених силою Кориоліса, приводить до зміни ємності диференційного конденсатора.

## 2. Математична модель конструкції МЕМС $z$ -осьового гіроскопа на карданному підвісі

Рух такого гіроскопа математично можна описати такою системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{c_x}{m_d}\right) \frac{dx}{dt} + \left(\frac{k_x}{m_d}\right) x = \frac{F_x}{m_d}; \\ \frac{d^2y}{dt^2} + \left(\frac{c_y}{m_s}\right) \frac{dy}{dt} + \left(\frac{k_y}{m_s}\right) y = 2\Omega_z \frac{dx}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $m_s$  – маса робочого органа;  $\Omega_z$  – кутова швидкість обертання платформи;  $k_x = m_s \omega_x^2$ ,  $k_y = m_d \omega_y^2$  – коефіцієнти жорсткості по осях  $x$  та  $y$ ;  $c_x$ ,  $c_y$  – коефіцієнти дисипації (загасання в матеріалі);  $dx/dt = v_x$  – швидкість коливань вібраційної структури;  $m_d = m_s + m_k$  – маса коливальної системи (карданний підвіс і робочий орган), де  $m_k$  – маса карданного підвіса.

Електростатична сила  $F_x(t)$ , що збуджує вимушені коливання вздовж осі  $x$ , визначається за формулою:

$$F_x(t) = F_0 \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

де  $F_0 = \frac{N h \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{g}$  – амплітуда збуджуючої сили;  $N$  – кількість гребінчастих електродів;  $h$  – висота електрода;  $V$  – напруга живлення;  $g$  – зазор між електродами;  $\omega_0$  – частота вимушених коливань.

Реєструючі електроди утворюють диференційний конденсатор рис. 2, його ємність змінюється при коливаннях робочого органа вздовж осі  $y$ . На електроди подають високу частоту (декілька МГц), яку вибирають залежно від необхідної чутливості гіроскопа; чим менша ємність, тим більша частота (рис. 3). Частота задається в процесі проектування гіроскопа. Вихідна напруга є пропорційною частоті коливань джерела змінного струму і зміні ємності, а отже, і кутовій швидкості вимірювання  $\Omega_z$ .

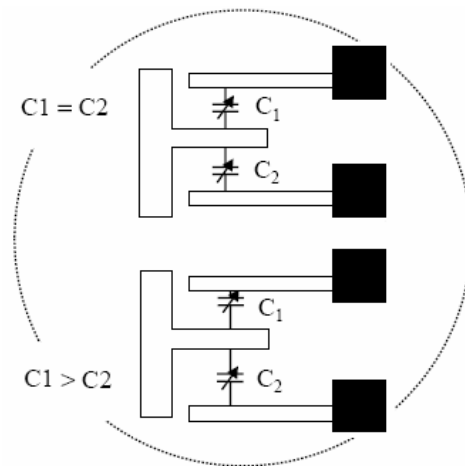
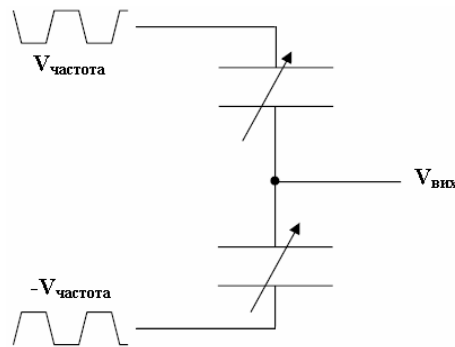


Рис. 2. Диференційний конденсатор, утворений реєструючими електродами,  $C_1 = C_2$  при  $\Omega_z = 0$  і  $C_1 > C_2$  при  $\Omega_z > 0$

Ємності  $C_1$  і  $C_2$  розраховують за формулами:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta - y}; \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta + y}, \quad (3)$$

де  $A$  – площа пластини конденсатора;  $\epsilon_r$  – діелектрична проникність середовища між пластинами конденсатора;  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;  $\delta$  – відстань між пластинами конденсатора при відсутності  $\Omega_z$ ;  $y$  – зміщення робочого органа.



$$V_{вих} = V_{частота} \left( \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

Рис. 3. Схема перетворення зміни ємності в частоту

Оскільки:

$$C_1 - C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A (\delta + y) - \epsilon_0 \epsilon_r A (\delta - y)}{\delta^2 - y^2} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r A y}{\delta^2 - y^2}; \quad C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A (\delta + y + \delta - y)}{\delta^2 - y^2} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r A \delta}{\delta^2 - y^2}. \quad (4)$$

тоді величина вихідного сигналу  $V_{вих}$  прямо пропорційна несучій частоті і зміщенню між пластинами при  $\Omega_z = 0$  ( $C_1 = C_2$ ,  $V_{вих} = 0$ ) і обернено пропорційна поточному зміщенню робочого органа:

$$V_{вих} = V_{частота} \left( \frac{y}{\delta} \right). \quad (5)$$

### 3. Розроблення VHDL-AMS – моделі мікромеханічного z-осьового гіроскопа на карданному підвісі

Проектування пристроїв MEMS на схемотехнічному рівні автоматизованого проектування передбачає побудову математичної моделі. Особливістю таких математичних моделей є те, що вони містять дані з різних галузей науки та техніки. Зокрема в моделі вібраційного гіроскопа, побудованого за MEMS технологіями, використовують величини з механіки та електрики. Для побудови таких моделей використовують спеціальну мову VHDL-AMS [5–8], якою можна описати роботу саме таких пристроїв.



Рис. 4. Блок-схема перетворення механічного руху в електричний сигнал для опису мовою VHDL-AMS

#### 4. Результати аналізу

Побудована модель дає змогу моделювати робочі та вимірювальні коливання гіроскопа, зміну струмів, вихідну напругу, чутливість пристрою від прикладеної кутової швидкості  $\Omega$ . Результати моделювання при  $\Omega = 1$  %/с графічно зображено на рис. 5–9.

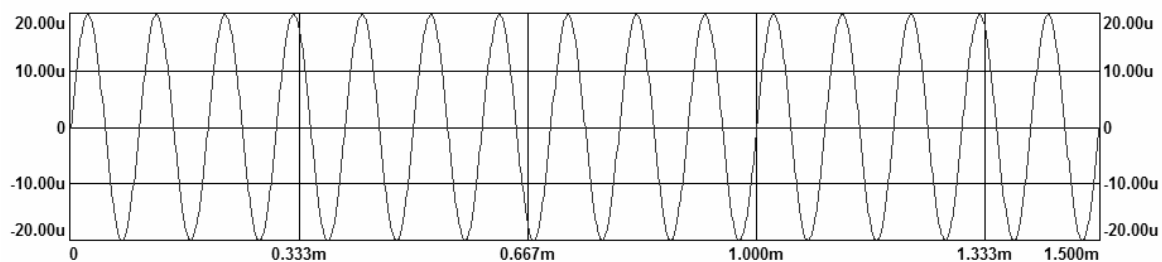


Рис. 5. Коливання вібраційної структури вздовж осі x

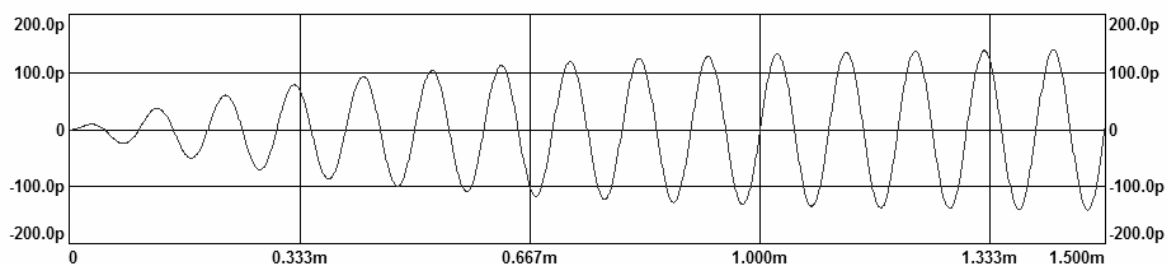


Рис. 5. Коливання робочого органа, спричинені силою Коріоліса, вздовж осі y

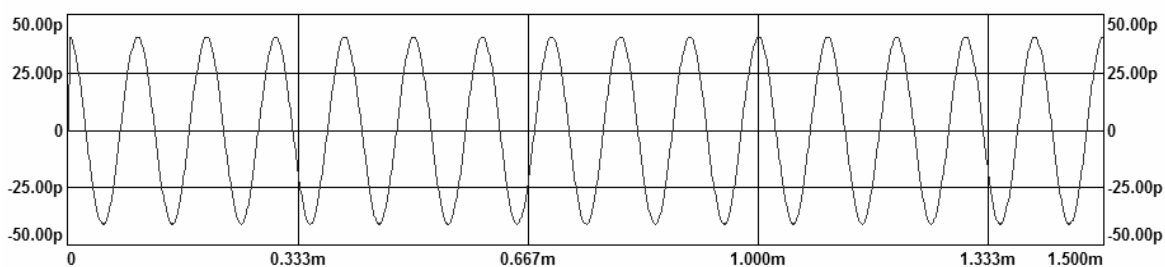


Рис. 6. Змінний струм, що протікає через  $C_1$

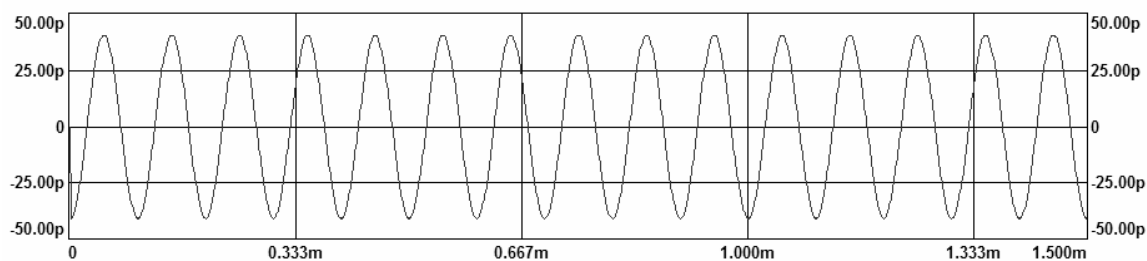


Рис. 7. Змінний струм, що протікає через  $C_2$

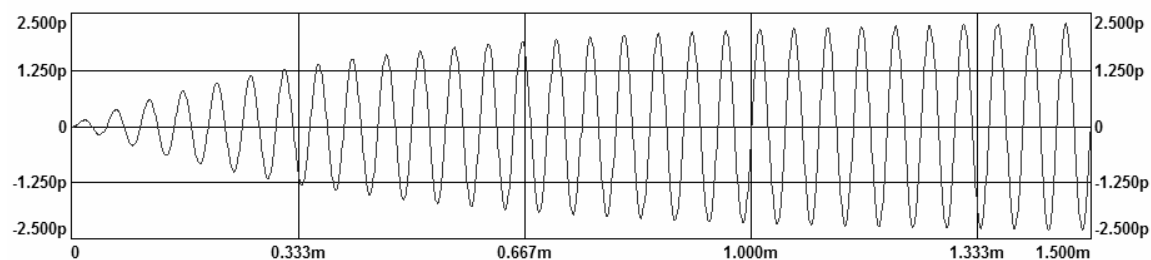


Рис. 8. Зміна напруги  $V_{вих}$

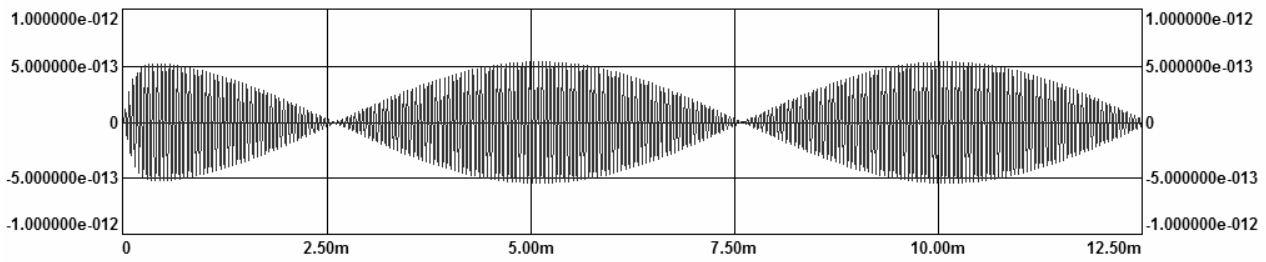


Рис. 9. Зміна напруги  $V_{\text{вих}}$  при обертанні з кутовою швидкістю  $\Omega = 1$  °/с на частоті 100 Гц

### Висновки

Розроблено VHDL-AMS модель мікромеханічного z-осьового гіроскопа на карданному підвісі, яка дає змогу аналізувати роботу цього пристрою на схемотехнічному рівні автоматизованого проектування. З отриманих внаслідок моделювання результатів випливає, що зміна вихідної напруги для пристрою цього класу знаходиться в діапазоні декількох піковольт, тому для ефективної обробки вихідного сигналу такого гіроскопа потрібні електричні схеми з високою чутливістю.

1. Steven Nasiri, "A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status", pp. 1–8, 2000. 2. Sitaraman V. Iyer, dissertation "Modeling and Simulation of Non-idealities in a Z-axis CMOS-MEMS Gyroscope". Analysis and Simulation of a CMOS-MEMS Gyroscope, Carnegie Mellon University, 1998. 3. Geen J., Krakauer D. New iMEMS Angular-Rate-Sensing Gyroscope. – Analog Dialogue, 37–03 (2003), [www.analog.com](http://www.analog.com). 4. Huikai Xie, dissertation "Gyroscope and Micromirror Design. Gyroscope Theory, Modeling, Design and Simulation, pp. 85-146, Carnegie Mellon University, August, 2002. 5. hAMSter Software for VHDL-AMS Simulations, [http://www.theinf.tu-ilmeneau.de/~twangl/VHDL-AMS\\_online\\_en/Home.html](http://www.theinf.tu-ilmeneau.de/~twangl/VHDL-AMS_online_en/Home.html). 6. Peter J. Ashenden EDA CONSULTANT, ASHENDEN DESIGNS PTY. LTD., "VHDL Tutorial", pp. 84, Elsevier Science 2004. 7. Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions – Packages for Multiple Energy Domain Support, pp. 21, December 2003. 8. VHDL 1076.1: Analog Extensions to VHDL, Ernst Christen, Analogy Inc., April 1997.