

Поведенческая модель микромеханического сенсора угловых скоростей для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab

И.Е. Лысенко, С.А. Синютин, О.Ю. Воронков

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Работа посвящена синтезу поведенческой модели сенсора угловых скоростей в среде Simulink программного пакета MatLab на основе математической модели этого устройства в форме дифференциальных уравнений. Приводятся результаты моделирования динамики синтезированной поведенческой модели сенсора в виде переходных процессов и спектрального анализа при реакции системы на внешние воздействия.

Ключевые слова: микросистемная техника, микроэлектромеханическая система, элементная база, гироскоп, электростатика, конструкция, модель, моделирование, переходной процесс, спектральный анализ.

Введение

В настоящее время развитию микросистемной техники (далее МСТ) уделяется большое внимание. По экспертным оценкам глобальный рынок микромеханических компонентов МСТ в 2017 году превысит 5,4 млрд долларов США. При этом в разы возрастет доля применения микромеханических сенсоров угловых скоростей (гироскопов) в бытовой электронике: планшетных компьютерах, мобильных телефонах, ноутбуках, электронных книгах, интерактивных игровых приставках и т.п. [1 – 5].

В данной статье рассматривается поведенческая модель электростатического микромеханического гироскопа (далее ММГ) с целью проверки работоспособности синтезируемых компонентов МСТ.

Конструкция сенсора

На рисунке 1 представлена конструкция микромеханического гироскопа.

Разработанный микромеханический гироскоп содержит инерционную массу 1, подвес чувствительного элемента 2, электростатические приводы 3, емкостные преобразователи перемещений 4.

Как известно [1], для получения наибольшей амплитуды колебаний инерционной массы под действием сил инерции Кориолиса необходимо добиваться равенства собственных частот колебаний по осям чувствительности (ось Y) и вынужденных колебаний под действием сил электростатики (ось X). Помимо коэффициента жесткости подвеса чувствительного элемента, зависящего от свойств материала структуры чувствительного элемента и конфигурации балок подвеса, влияние на динамические свойства чувствительного элемента оказывают также емкостные преобразователи перемещений и электростатические приводы через коэффициент электростатической упругости. Коэффициент электростатической упругости негативно влияет на динамические свойства микромеханического компонента, уменьшая действие восстанавливающих сил. Необходимо помнить, что данный коэффициент усиливает эффект неконтролируемого электростатического притяжения и снижает пороговое напряжение его наступления [1, 5, 6].

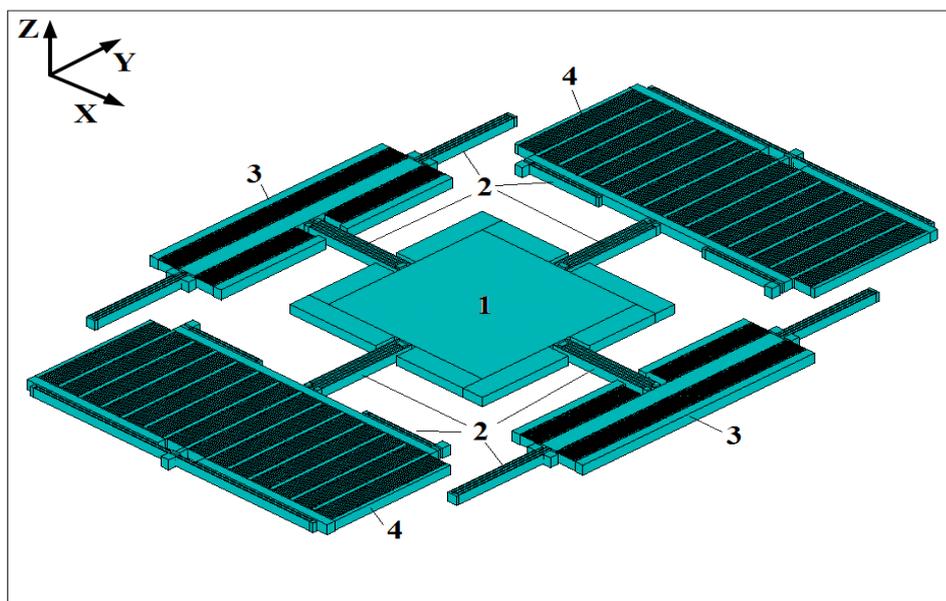


Рис. 1. – Микромеханический сенсор угловых скоростей

Математическая модель

Математическая модель движения чувствительного элемента ММГ может быть получена на основе уравнения Лагранжа 2-го рода и представлена следующим образом [1, 8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -2 \cdot \delta \cdot \dot{x} - \omega_1^2 \cdot x + (F_{el2} - F_{el1}) \cdot m^{-1} + \\ \quad + F_x \cdot m^{-1} + \Omega \cdot (\dot{y} + \Omega \cdot x), \\ \ddot{y} = -2 \cdot \delta \cdot \dot{y} - \omega_2^2 \cdot y + F_k \cdot m^{-1} + (F_{el4} - F_{el3}) \cdot m^{-1} + \\ \quad + F_y \cdot m^{-1} - \Omega(\dot{x} - \Omega \cdot y), \end{array} \right. \quad (1)$$

где x, y – перемещения чувствительного элемента по осям X и Y ; m – масса чувствительного элемента; δ – коэффициент затухания; ω_1, ω_2 – собственные частоты колебаний; F_x, F_y – силы инерции; F_{el1}, F_{el2} – электростатические силы; F_k – сила инерции Кориолиса; Ω – угловая скорость.

Силы, действующие на чувствительный элемент, выражаются равенствами [1, 9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{el1} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC1}, \\ F_{el2} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC2}, \\ F_{el3} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC3}, \\ F_{el4} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1} \cdot U_{DC} U_{AC4}, \\ F_k = 2 \cdot m \cdot x \cdot \omega_1 \cdot \Omega, \\ F_x = m \cdot a_x, \\ F_y = m \cdot a_y, \end{array} \right. \quad (2)$$

где N_1 – число пальцев подвижного гребенчатого электрода электростатического привода; ε – относительная диэлектрическая

проницаемость воздушного зазора; ε_0 – электрическая постоянная; h – толщина структурного слоя; d_1 – зазор между пальцами гребенок подвижного и неподвижного электродов электростатического привода; U_{DC} – постоянное напряжение; U_{AC1} , U_{AC2} , U_{AC3} , U_{AC4} – переменные напряжения; a_x , a_y – линейные ускорения по осям X и Y ;

Изменение емкостей преобразователей перемещений считается по формулам [1, 9, 10]:

$$\begin{cases} dC_x = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot l \cdot h}{d_2^2} \cdot x, \\ dC_y = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot l \cdot h}{d_2^2} \cdot y, \end{cases} \quad (3)$$

где N_2 , N_3 – число пальцев и гребенок подвижных электродов емкостных преобразователей перемещений; l – длина перекрытия пальцев гребенок подвижных электродов емкостных преобразователей перемещений; d_2 – зазор между пальцами гребенок подвижного и неподвижного электродов емкостных преобразователей перемещений.

Собственные частоты чувствительного элемента ММГ будут определяться выражениями:

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{k - k_{el1}}{m}} = \sqrt{\omega_{01}^2 - \frac{k_{el1}}{m}}, \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{k - k_{el2}}{m}} = \sqrt{\omega_{02}^2 - \frac{k_{el2}}{m}}, \end{cases} \quad (4)$$

где k – жесткость подвеса чувствительного элемента; k_{el1} , k_{el2} – коэффициенты электростатической упругости, вычисляемые из уравнений:

$$\begin{cases} k_{el1} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1 \cdot x} \cdot U_{DC} U_{AC1}, \\ k_{el2} = 2 \cdot N_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d_1 \cdot y} \cdot U_{DC} U_{AC3}. \end{cases} \quad (5)$$

Поведенческая модель

На основе математической модели (1) с учетом выражений (2 – 5) была разработана поведенческая модель микромеханического гироскопа.

На рисунке 2 представлена поведенческая модель ММГ, разработанная для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab.

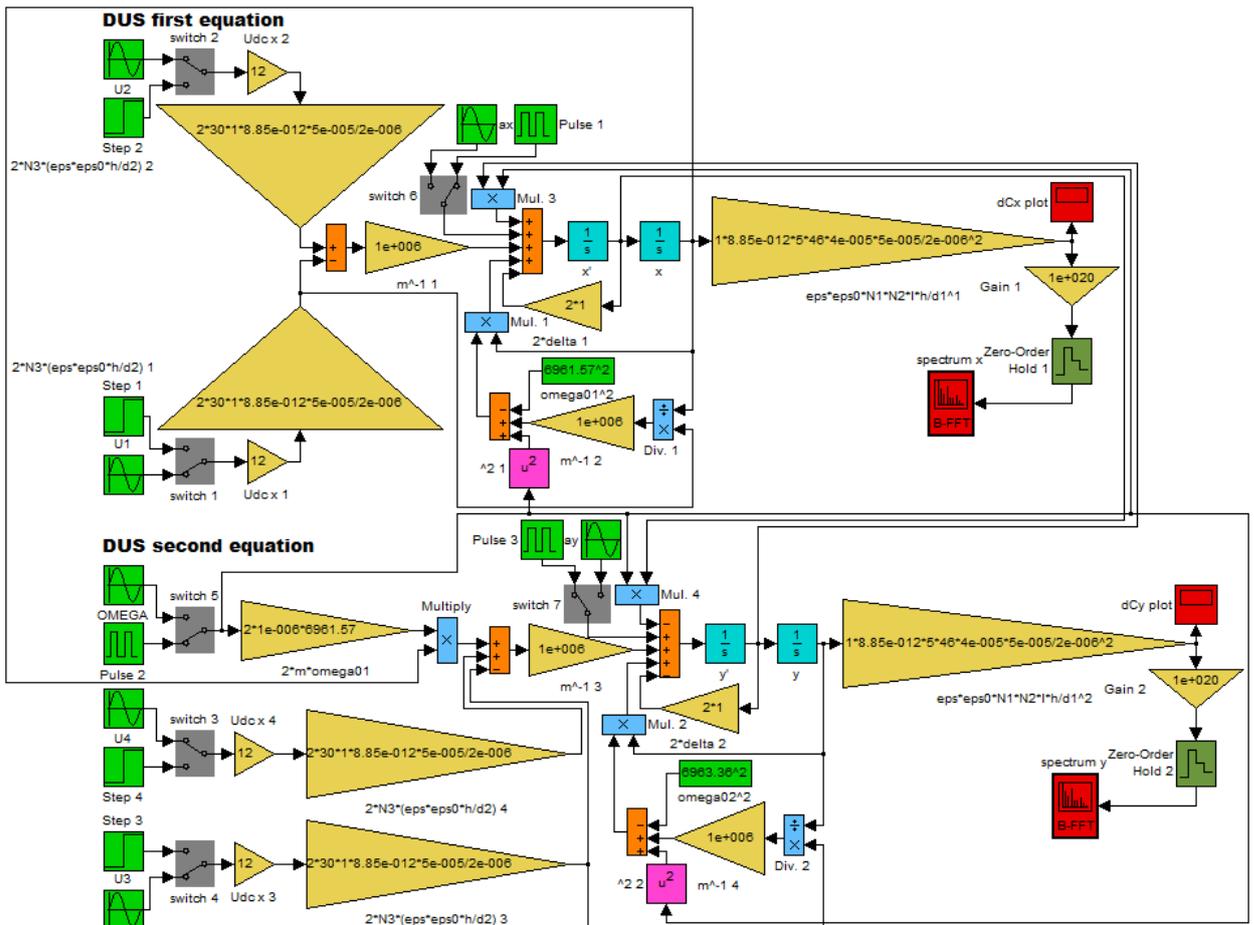


Рис. 2. – Поведенческая модель сенсора угловых скоростей

С применением прямых и обратных связей на главные сумматоры



подаются одночлены из уравнений: сигналы со входов системы, собственно переменные состояния и их первые производные с требуемыми знаками (плюс или минус в зависимости от знака в уравнении) и коэффициентами. На входах системы оказываются переменные, не относящиеся к переменным состояниям, т.е. исходные данные, не являющиеся константами. Именно они играют роль задающих воздействий, характер которых определяется целями управления. Прохождение сигналов по блок-схеме реализуется посредством прямых и обратных связей, усилительных коэффициентов, сумматоров и умножителей в соответствии с уравнениями в переменных состояниях.

Результаты моделирования

Результаты моделирования динамики синтезированной системы представлены графически на рисунках 3 – 6 в виде переходных процессов и спектрального анализа, имеющих целью исследование параметров демпфирования и частотных свойств объекта. Переходные процессы являются реакцией системы на прямоугольные импульсы (именно по этим законам в рамках поставленного эксперимента изменяются во времени линейные ускорения a_x , a_y и угловая скорость Ω). Спектральным анализом отражены собственные резонансы системы на частотах ω_{01} и ω_{02} .

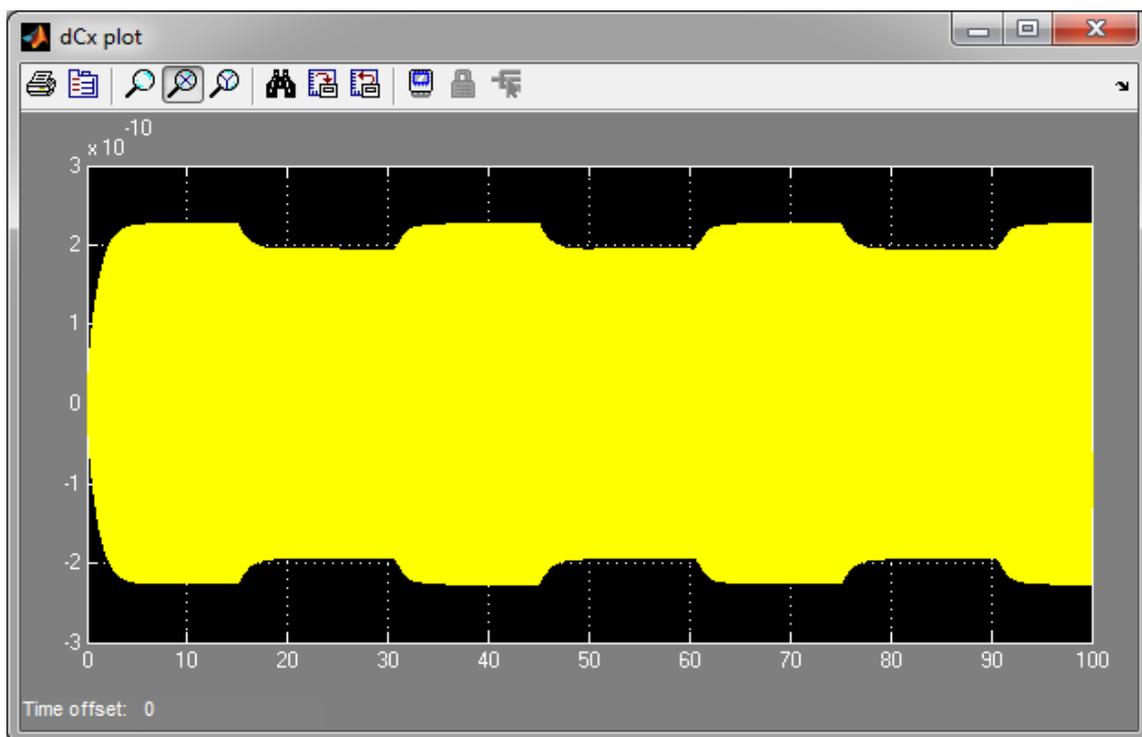


Рис. 3. – Переходной процесс относительно переменной x
(измерение линейного ускорения по оси x)

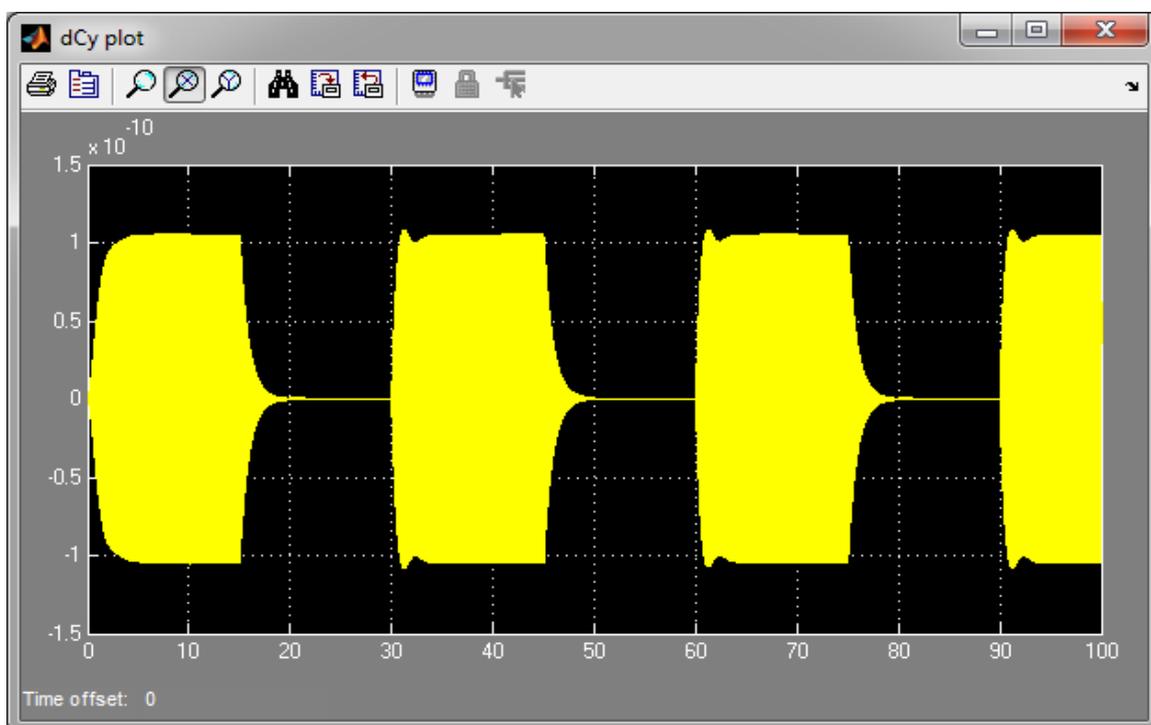


Рис. 4. – Переходной процесс относительно переменной y
(измерение линейного ускорения по оси y)

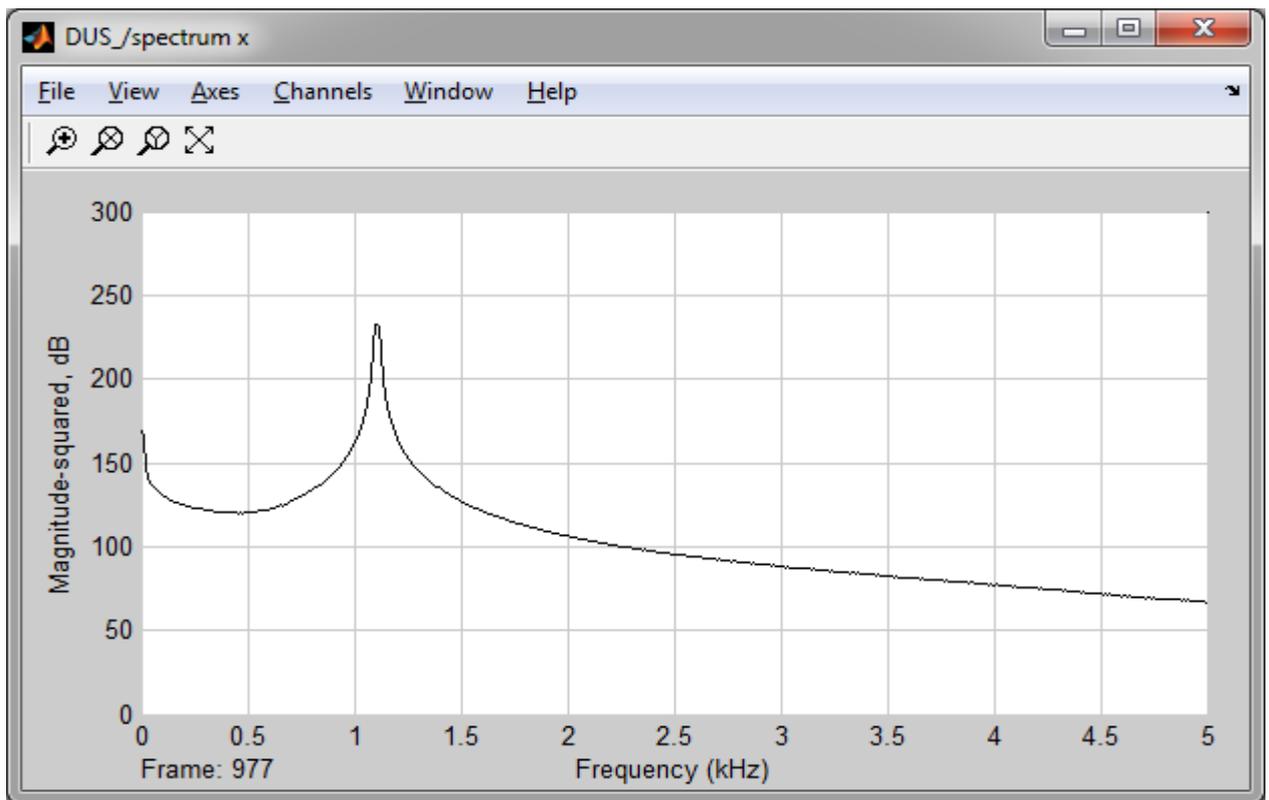


Рис. 5. – Спектральная мощность переменной x

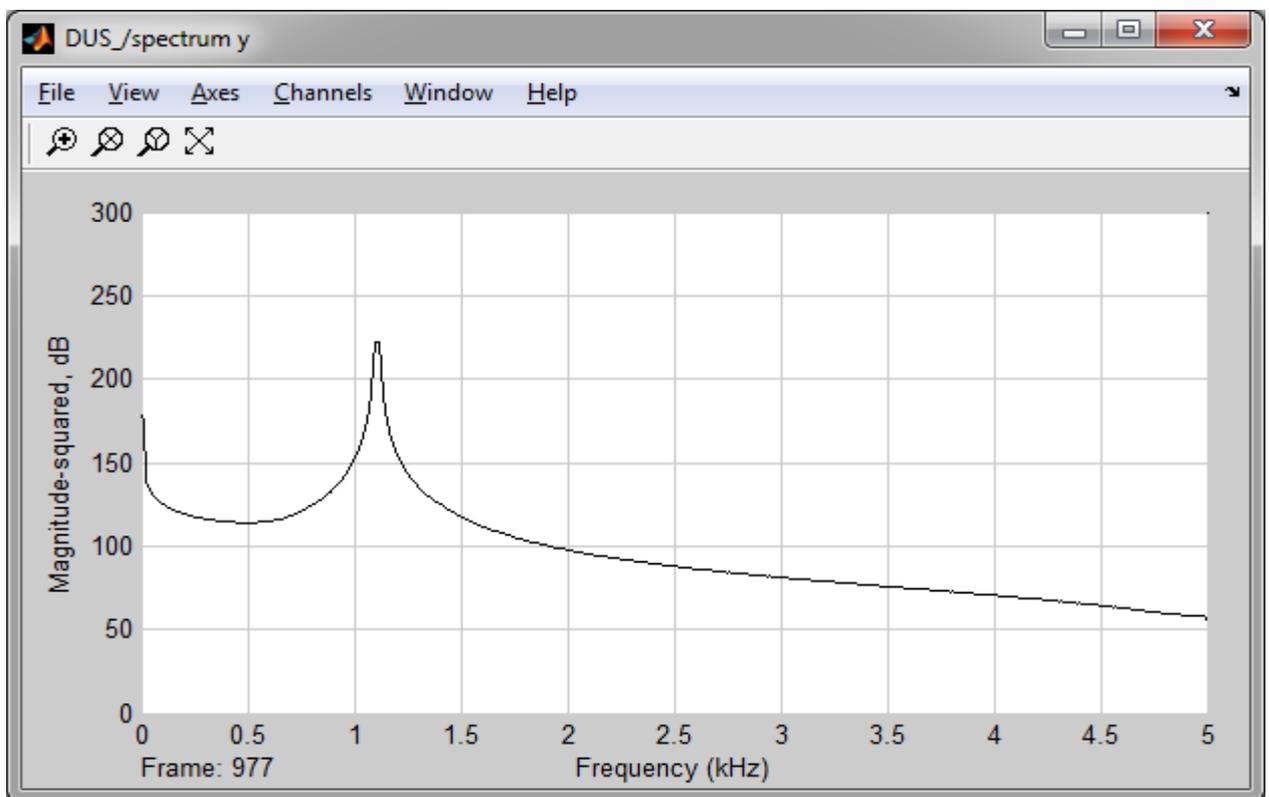


Рис. 6. – Спектральная мощность переменной y

В ходе моделирования ММГ периоды импульсов равны: на входе переменной a_x – 50 с, на входе переменной a_y – 20 с, на входе переменной Ω – 30 с.

Заключение

Моделированием подтверждена корректная работа сенсора угловых скоростей. В ходе эксперимента была выявлена высокая добротность колебательной системы, обусловленная малым демпфированием и отраженная медленным затуханием переходных процессов, а также ярко выраженными резонансами.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в Южном федеральном университете (г. Ростов-на-Дону).

Литература

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Тула: Тульский государственный университет, 2007. 400 с.
2. Тимошенко С.П., Кульчицкий А.П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Нано- и микросистемная техника. 2012. №6. С. 51 – 56.
3. Аравин В.В., Вернер В.Д., Сауров А.Н., Мальцев П.П. МЭМС высокого уровня – возможный путь развития МЭМС в России // Нано- и микросистемная техника. 2011. №6. С. 28 – 31.

4. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Резнев А.А., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2008. №8. С. 2 – 6.

5. Лысенко И.Е. Интегральные микромеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. 180 с.

6. Alper, S.E., K. Azgin and T. Akin, 2007. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. Sensors and Actuators A, 135: 34 – 42.

7. Lysenko, I.E., 2013. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis. World Applied Sciences Journal, 27 (6): 759 – 762.

8. Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е., Шерова Е.В. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений // Инженерный вестник Дона, 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/240.

9. Лысенко И.Е., Ежова О.А. Критерии равенства собственных частот колебаний чувствительных элементов микромеханических гироскопов-акселерометров // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.

10. Лысенко И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.

References

1. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical devices]. Tula: Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2007. 400 p.

2. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2012. №6. pp. 51 – 56.

3. Aravin V.V., Verner V.D., Saurov A.N., Mal'tsev P.P. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2011. №6. pp. 28 – 31.

4. Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznev A.A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2008. №8. pp. 2 – 6.
5. Lysenko I.E. Integral'nye mikromekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Integral micromechanical angular rate and linear acceleration sensors]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013. 180 p.
6. Alper, S.E., K. Azgin and T. Akin, 2007. A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure. Sensors and Actuators A, 135: 34 – 42.
7. Lysenko, I.E., 2013. Modeling of the micromachined angular rate and linear acceleration sensors LL-type with redirect of drive and sense axis. World Applied Sciences Journal, 27 (6): 759 – 762.
8. Konoplev B.G., Lysenko I.E., Sherova E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/240.
9. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2475.
10. Lysenko I.E. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.