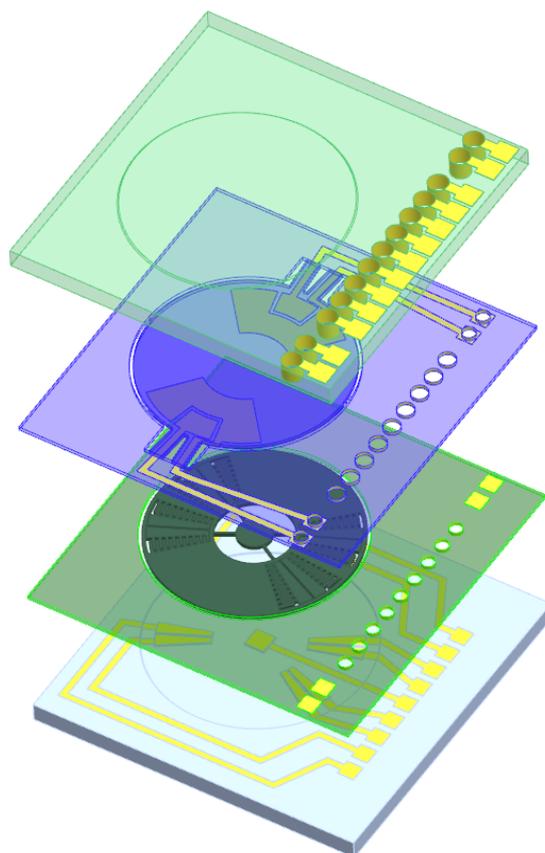


М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ММГ НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума**



**Санкт-Петербург
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА НА
ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2017

Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Имитационное моделирование динамики микромеханического гироскопа на вибрирующем основании. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 21 с.

В пособии представлен лабораторный практикум по имитационному моделированию динамики микромеханического гироскопа на вибрирующем основании. Приводятся методические указания к выполнению лабораторной работы, направленной на освоение практических навыков имитационного моделирования динамики микромеханического гироскопа в условиях вибрационных воздействий.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров – 24.03.02 «Системы управления движением и навигация» (2 год обучения).

Рекомендовано к печати на заседании Ученого совета Мегафакультета КТиУ, 03.04.2017, протокол №3



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список использованных сокращений и аббревиатур.....	4
1 Цель работы	5
2 Теоретическая часть	5
3 Описание модели	11
4 Порядок выполнения имитационного моделирования.....	14
5 Требования к оформлению лабораторной работы.....	16
6 Техника безопасности	16
7 Контрольные вопросы.....	17
8 Список литературы.....	18

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ И АББРЕВИАТУР

ДМ – датчик момента
ДУ – датчик угла
ИТ – инерционное тело
ММГ – микромеханический гироскоп
ПЭ – подвижный электрод
СУ – система управления
УП – упругий подвес
ЧЭ – чувствительный элемент

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Лабораторная работа направлена на освоение практических навыков имитационного моделирования динамики микромеханического гироскопа в условиях вибрационных воздействий и предназначена для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров – 161100 «Системы управления движением и навигация» (2 год обучения).

Для выполнения работы требуется 4 академических часа.

В результате изучения выполнения работы студент должен

ИМЕТЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ:

- о современном состоянии разработок микромеханических гироскопов и о специфических условиях их эксплуатации на различных подвижных объектах.

ЗНАТЬ:

- основные элементы модели динамики микромеханического гироскопа и его функциональных устройств;
- современные методы моделирования в среде MATLAB.

УМЕТЬ:

- использовать знания принципов расчета и моделирования приборов при различных условиях вибрационных воздействий;
- использовать специальную литературу и другие информационные данные (в том числе на иностранных языках);
- применять вычислительную среду Simulink программы MATLAB САПР при решении практических задач.

ПОЛУЧИТЬ ПРАКТИЧЕСКИЕ НАВЫКИ:

- работы с технической документацией, технической литературой, справочниками и другими информационными источниками; использования вычислительной техники и программ моделирования.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Микромеханические гироскопы (ММГ) широко используются в различной аппаратуре гражданской и военной техники. Повышение требований к техническим параметрам ММГ обусловливается постоянным расширением областей применения приборов и инерциальных модулей, в которых ММГ являются датчиками угловых скоростей. Одной из основных проблем при создании ММГ является обеспечение его механической стойкости в различных, в том числе экстремальных, условиях эксплуатации.

Современные требования к характеристикам и показателям ММГ постоянно повышаются в связи с расширением областей применения, в значительной мере отличающихся все более высоким уровнем внешних воздействующих факторов, в частности, более широким диапазоном

параметров вибраций и ударов. Потребность в микромеханических приборах, сохраняющих показатели точности и другие эксплуатационные характеристики при расширенных диапазонах параметров воздействий, существует в таких областях, как подземная навигация при проходке скважин, военная техника, строительство, все транспортные средства, железно- и автодорожное хозяйство. При этом требуется обеспечение стойкости (работоспособности и сохранения показателей точности) ММГ в особо жестких условиях. Стойкость ММГ должна обеспечиваться при следующих параметрах внешних инерционных воздействий: амплитуды виброускорений до 15 g, частотный диапазон до 5 кГц, удары с пиковыми значениями ускорений до 20000 g при длительности порядка 0,1 мс. Отметим, что при длительно действующих перегрузках их значения устанавливаются на уровне от нескольких десятков до 100 g, что значительно ниже, чем при ударах, но выше, чем при виброиспытаниях.

Сами конструкции ММГ, как правило, очень жесткие. Ввиду малой массы (единицы граммов) и малых габаритов (~10 мм) низшие собственные частоты таких конструктивных элементов ММГ, как чувствительный элемент (ЧЭ) в виде чипа, содержащего инерционное тело (ИТ) на упругом подвесе, находятся в диапазоне от единиц до десятков килогерц. Это в соответствии с результатами многократно произведенных расчетов должно исключать резонансные явления в установленной для виброиспытаний полосе частот до 2 кГц. Практически все современные ММГ демонстрируют работоспособность в полосе частот до 1 кГц, некоторые образцы сохраняют метрологические характеристики при вибрациях и до 2 кГц, при этом вибропрочность обеспечивается до 5 кГц. Судя по данным публикаций, более высокую стойкость могут иметь полностью твердотельные ММГ на поверхностных акустических волнах, однако их разработка еще не вышла за рамки лабораторных исследований. При представлении результатов определения метрологических характеристик ММГ в одних случаях достаточно установить, до каких значений амплитуд ускорений дополнительные погрешности ММГ пренебрежимо малы, а в других случаях важна только сохранность характеристик и время восстановления после окончания воздействий.

Повышению вибрационной и ударной стойкости ММГ уделяется существенное внимание, показатель их стойкости к механическим воздействиям считается одним из ключевых показателей. Следует отметить, что с 2002 г. в США под эгидой оборонного агентства DARPA разрабатывается программа HERMiT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology), которая первоначально была ориентирована на создание новой технологии корпусирования и контроля внутренней среды микромеханических приборов в неблагоприятных условиях эксплуатации. На сегодняшний день цели программы расширены до поиска решения вопросов повышения надежности и долговременной

особенностями прибора – использованием преобразователя угла в виде пары электродов как плоского конденсатора переменной емкости в датчиках угла (ДУ) вторичных (выходных) колебаний и датчиках моментов вторичных колебаний (ДМ). Один из электродов конденсатора образован сектором поверхностного слоя дискового ИТ на упругом подвесе, что при действии инерционных нагрузок приводит к изменению зазора, емкости и, в конечном счете, к нелинейности цепи СУ. При этом сила взаимодействия двух пластин конденсатора прямо пропорциональна квадрату величины электрического напряжения и обратно пропорциональна квадрату величины зазора между пластинами.

Для обеспечения инвариантности зазора в датчиках системы управления при внешних перегрузках плоский конденсатор должен сохранять зазор и быть образован дисковым ИТ на упругом подвесе и подвижным электродом (ПЭ) на своем упругом подвесе. Причем собственные частоты поступательных колебаний ИТ и ПЭ в соответствующих упругих подвесах выбираются равными или, по крайней мере, близкими. Схема такого ММГ показана на рис. 2, на которой ПЭ представлен в виде площадки с двумя парами электродов ДУ и ДМ.

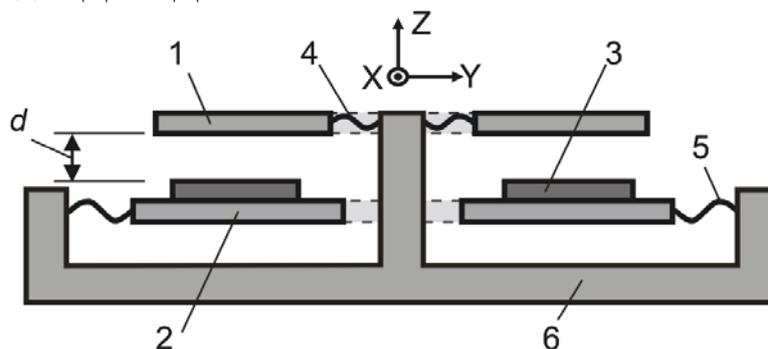


Рисунок 2 – Схема ММГ с электродами на упругом подвесе
 1 – ИТ; 2 – площадка ПЭ; 3 – электроды ДУ и ДМ; 4 – упругий подвес ИТ;
 5 – упругий подвес ПЭ; 6 – основание; d – зазор между ИТ и ПЭ.

Вследствие воздействия ускорения, например, в направлении оси Z происходят равные деформации упругих подвесов ИТ и ПЭ, обеспечивая неизменность зазора между ними. Амплитуды вынужденных перемещений ИТ и ПЭ под действием постоянного или вибрационного ускорений равны или близки (в зависимости от соотношения собственных частот подвесов).

Для исследования ММГ с ПЭ при наличии вибрации по оси Z за основу принята математическая модель, учитывающая электромеханические взаимодействия в емкостных преобразователях, которая дополнена системой уравнений движения ПЭ. Таким образом, эта модель представляет собой две системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + 2\xi_{z1}\omega_{z1}\dot{z}_1 + \omega_{z1}^2 z_1 = W_z + (W_1 + W_2), \\ \ddot{\gamma}_1 + 2\xi_{\gamma1}\omega_{\gamma1}\dot{\gamma}_1 + \omega_{\gamma1}^2 \gamma_1 = \varepsilon_{\gamma}^B, \\ \ddot{\alpha}_1 + 2\xi_{\alpha1}\omega_{\alpha1}\dot{\alpha}_1 + \omega_{\alpha1}^2 \alpha_1 = -2\Omega_y \dot{\gamma}_1 + \varepsilon_{\alpha1}^{DM}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_2 + 2\xi_{z2}\omega_{z2}\dot{z}_2 + \omega_{z2}^2 z_2 = W_z - (W_1 + W_2), \\ \ddot{\alpha}_2 + 2\xi_{\alpha2}\omega_{\alpha2}\dot{\alpha}_2 + \omega_{\alpha2}^2 \alpha_2 = -\varepsilon_{\alpha2}^{DM}. \end{cases} \quad (2)$$

В системах (1) и (2) использованы следующие обозначения:

z_1, z_2 – прогибы упругих подвесов ИТ и ПЭ по оси Z ;

γ_1, α_1 – амплитуды угла колебаний ИТ по оси первичных (ось X) и вторичных (ось Z) колебаний;

α_2 – амплитуда угла колебаний ПЭ по оси X ;

$\omega_{\alpha1}, \omega_{\alpha2}$ – собственные частоты угловых колебаний ИТ и ПЭ по оси X ;

$\omega_{\gamma1}$ – собственная частота угловых колебаний ИТ по оси Z ;

ω_{z1}, ω_{z2} – собственные частоты поступательных колебаний ИТ и ПЭ по оси Z ;

$\xi_{z1}, \xi_{\gamma1}, \xi_{\alpha1}, \xi_{z2}, \xi_{\alpha2}$ – коэффициенты затухания соответствующих контуров колебаний ИТ и ПЭ;

W_z – ускорение вдоль оси Z , вызванное внешними нагрузками;

$W_1 = F_1/m_1, W_2 = F_2/m_2$ – ускорения, создаваемые силами F_1 и F_2 на электродах ДМ;

m_1, m_2 – массы ИТ и ПЭ;

$\varepsilon_{\gamma}^B = M_{\gamma1}^B/J_{z1}$ – угловое ускорение, вызванное моментом сил возбуждения $M_{\gamma1}^B$ по оси первичных колебаний;

$\varepsilon_{\alpha1}^{DM} = M_{DM}(\alpha)/J_{x1}; \varepsilon_{\alpha2}^{DM} = M_{DM}(\alpha)/J_{x2}$ – угловые ускорения от момента управляющего воздействия, прикладываемого ДМ к ИТ и ПЭ соответственно;

J_{x1}, J_{z1} – моменты инерции ИТ по осям X и Z ;

J_{x2} – момент инерции ПЭ по оси X ;

Ω_y – измеряемая угловая скорость.

Угловые и поступательные перемещения ИТ относительно ПЭ определяются из выражений

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_1 - \alpha_2, \\ z = z_1 - z_2, \end{cases} \quad (3)$$

Силы, возникающие на электродах ДМ при подаче на них напряжений, равны

$$\begin{cases} F_1 = k_{DM1} U_1^2 (d - z - \alpha R)^{-2}, \\ F_2 = k_{DM2} U_2^2 (d - z + \alpha R)^{-2}, \\ M_{DM}(\alpha) = (F_1 - F_2)R, \\ k_{DM1} = \frac{1}{2}\varepsilon_A S_{DM1}, k_{DM2} = \frac{1}{2}\varepsilon_A S_{DM2}, \end{cases} \quad (4)$$

где: ε_A – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

S_{DM1}, S_{DM2} – площади электродов ДМ;

U_1, U_2 – переменные напряжения на электродах ДМ, формируемые в СУ на основании изменения емкости на обкладках ДУ ΔC и обеспечивающие демпфирование вторичных колебаний;

d – номинальное значение зазора между обкладками ДМ и ДУ;

R – средний радиус расположения электродов ДМ и ДУ.

Изменение емкости на обкладках ДУ вычисляется при помощи следующих выражений:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_1 - C_2, \\ C_1 &= k_{ДУ1} (d - z - \alpha R)^{-1}, \\ C_2 &= k_{ДУ2} (d - z + \alpha R)^{-1}, \\ k_{ДУ1} &= \varepsilon_A S_{ДУ1}, \quad k_{ДУ2} = \varepsilon_A S_{ДУ2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где: $S_{ДУ1}, S_{ДУ2}$ – площади электродов ДУ;

C_1 и C_2 – емкости на электродах ДУ.

Выходной сигнал ММГ в общем виде можно представить в виде выражения

$$u(t) = K_{П} A(\Omega) = K_{ПЕН} K_{ДУВК} A(\Omega_y), \quad (6)$$

где: $K_{П}$ – коэффициент преобразования ММГ;

$K_{ДУВК} = \Delta C/\alpha$ – коэффициент преобразования ДУ вторичных колебаний;

$K_{ПЕН}$ – коэффициент преобразователя «емкость-напряжение»;

$A(\Omega_y)$ – огибающая вторичных колебаний, содержащая информацию о действующей угловой скорости Ω .

Блок-схема математической модели (1) – (6) представлена на рис. 3.

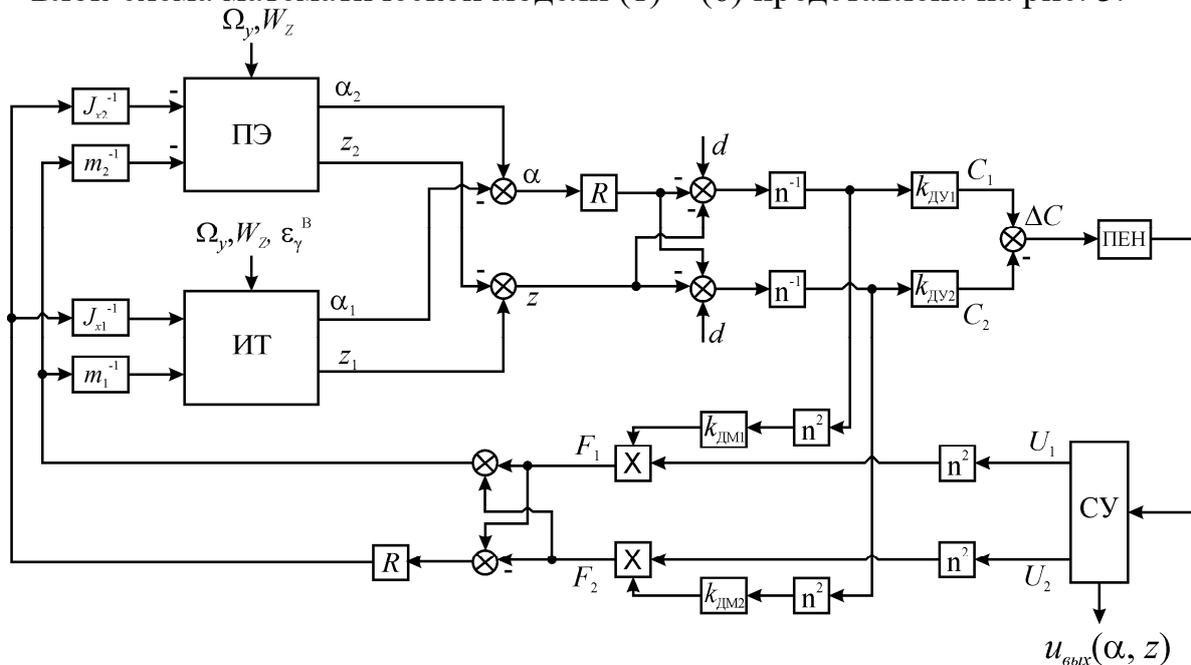


Рисунок 3 – Блок-схема модели ММГ с ПЭ.

ПЕН – преобразователь «емкость – напряжение»; n^{-1}, n^2 – операторы преобразования; $u_{\text{вых}}(\alpha, z)$ – выходной сигнал ММГ.

Системы уравнений (1) и (2) описывают динамику ИТ и ПЭ

соответственно, уравнения (3) учитывают взаимосвязь как поступательных, так и угловых колебаний ИТ и ПЭ, уравнения (4), (5) и (6) описывают электромеханические взаимодействия в приборе, создаваемые ДМ и ДУ.

В системе уравнений (1) не учитывается влияние напряжений U_1 и U_2 на изменение собственных частоты $\omega_{\alpha 1}$, $\omega_{\alpha 2}$, ω_{z1} , ω_{z2} и формирование «отрицательных» жесткостей. Влияние вибрации на вторичные угловые колебания ИТ определяется членом $\varepsilon_{\alpha 1}^{DM}$, так как характеристики ДМ и прикладываемый момент зависят от поступательного движения по оси OZ.

3 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Математическая модель ММГ с ПЭ (1) – (6) запрограммирована в среде Simulink MATLAB (рис.4, 5).

Имитационное моделирование динамики ММГ в условиях вибрации следует проводить для двух типов гироскопов – «ММГ-2» и «ММГ-ЭП», которые различаются значениями собственных частот УП. Типу «ММГ-2» соответствуют следующие значения параметров:

$$\omega_{\alpha 1} = 20\,420 \text{ рад/с (3250 Гц)},$$

$$\omega_{\gamma 1} = 18\,944 \text{ рад/с (3015 Гц)},$$

$$\omega_{z1} = 57\,805 \text{ рад/с (9200 Гц)}.$$

Собственные частоты УП гироскопа типа «ММГ-ЭП» равняются:

$$\omega_{\alpha 1} = 51\,810 \text{ рад/с (8250 Гц)},$$

$$\omega_{\gamma 1} = 50\,240 \text{ рад/с (8000 Гц)},$$

$$\omega_{z1} = 75\,360 \text{ рад/с (12\,000 Гц)}.$$

Остальные значения параметров у обоих типов ММГ одинаковые:

$$\varepsilon_A = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$\omega_{z2} = \omega_{z1}(1 + \delta\omega);$$

$$\xi_{\alpha 1} = \xi_{\alpha 2} = 5 \cdot 10^{-5}; \xi_{z1} = \xi_{z2} = 2 \cdot 10^{-4}; \xi_{\gamma 1} = 5 \cdot 10^{-6};$$

$$m_1 = m_2 = 8 \cdot 10^{-7} \text{ кг};$$

$$J_{x1} = J_{x2} = 5,25 \cdot 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; J_{z1} = 7,26 \cdot 10^{-13} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$S_{DM1} = 0,3 \text{ мм}^2; S_{DM2} = \delta_{DM} \cdot S_{DM1};$$

$$S_{DU1} = 1 \text{ мм}^2; S_{DU2} = \delta_{DU} \cdot S_{DU1};$$

$$d = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$R = 1,025 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

В ходе выполнения работы исследуется чувствительность математической модели (1) – (6) к изменению следующих параметров:

неравенство собственных частот ИТ и ПЭ $\delta\omega$ в диапазоне от -0,1 до 0,1;

неравенство площадей ДМ δ_{DM} в диапазоне от 0,9 до 1,1;

неравенство площадей ДУ δ_{DU} в диапазоне от 0,9 до 1,1.

Значения параметров внешних воздействий варьируются в следующих пределах:

амплитуда вибрация основания W в диапазоне от 2 до 10 g;

диапазон частоты вибрации ν в диапазоне от 20 до 2000 Гц;

угловая скорость основания Ω_y в диапазоне от 0 до 100 °/с;

Все перечисленные параметры следует вводить в файл «*param.m*» с размерностью, соответствующей системе СИ. В таблице 1 приведены пояснения к обозначениям, используемым в указанном файле.

ВНИМАНИЕ! Не указанные в таблице параметры используются для настройки решателя, их изменение может привести к неожиданным результатам и сбоям в работе программы.

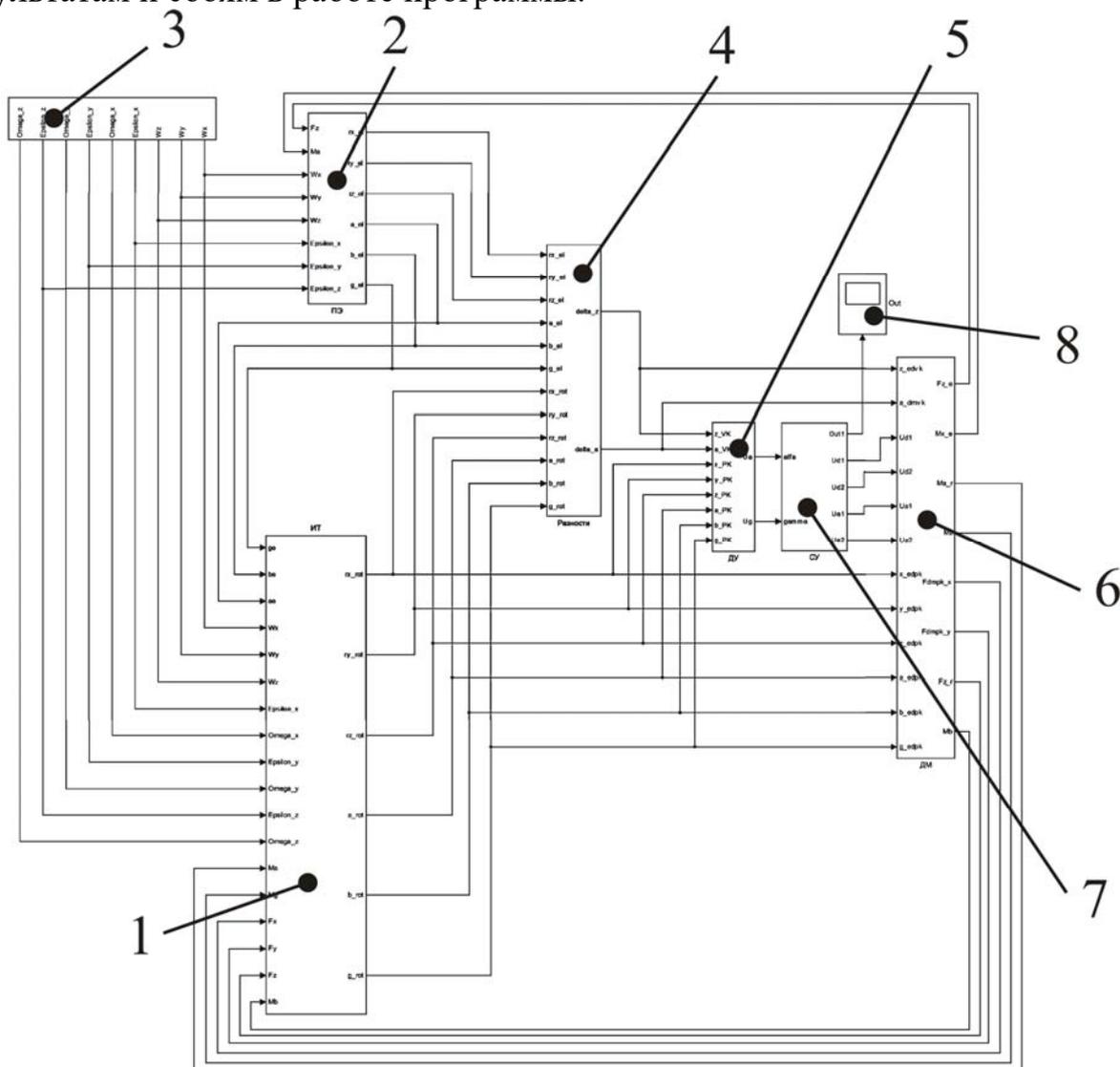


Рисунок 4 – Модель ММГ RR-типа с ПЭ в Simulink

- 1 – Модель ИТ; 2 – Модель ПЭ; 3 – Подсистема внешних воздействий;
- 4 – Подсистема разностных вычислений; 5 – Модель ДУ; 6 – Моель ДМ;
- 7 – Модель СУ; 8 – Блок выходного сигнала

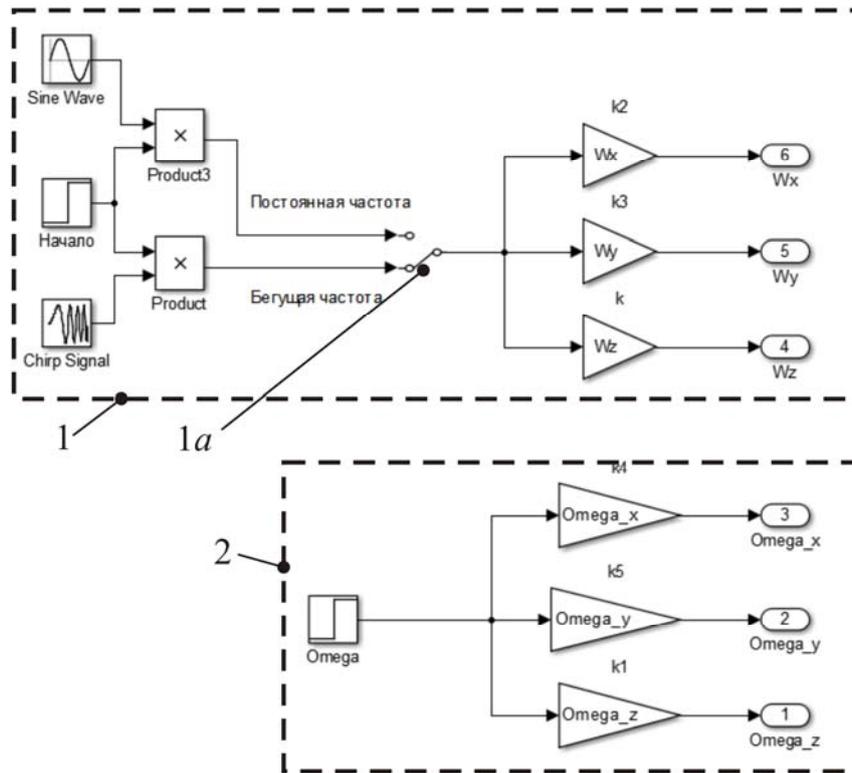


Рисунок 5 – Подсистема внешних воздействий в Simulink
 1 – Подсистема поступательных ускорений;
 1а – Переключатель между вибрацией с постоянной частотой и бегущей;
 2 – Подсистема угловых скоростей

Таблица 1. Обозначения в файле «*param.m*»

Обозначение	Пояснение	Обозначение	Пояснение
wx_1	ω_{x1}	Omega_y	Ω_y
wy_1	ω_{y1}	delta_DU	$\delta_{дм}$
wz_1	ω_{z1}	delta_DM	$\delta_{ду}$
wa_1	$\omega_{\alpha 1}$	zero	Смещение нуля
wb_1	$\omega_{\beta 1}$		
wg_1	$\omega_{\gamma 1}$	МК	Масшт. коэфф.
Wx	W_x		
Wy	W_y		
Wz	W_z	pe	Взаимосвязь с ПЭ
delta_w	$\delta\omega$		

Время моделирования задается равным 3 секундам. К окончанию первой секунды в моделируемом датчике заканчиваются все переходные процессы. Со второй секунды подключаются внешние воздействия – поступательная вибрация или угловая скорость. Последняя задается с постоянной амплитудой и не изменяется во времени. Вибрация задается по периодическому закону с нарастающей со скоростью 0,001 Гц/с частотой. Таким образом, за время 2 секунды моделируется воздействие в диапазоне

до 2000 Гц, а действующая в определенное время частота определяется из выражения $(t - 1) \cdot 1000$ (где t – время моделирования, с).

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Исследование динамики микромеханического гироскопа без подвижного электрода

4.1.1 Запустить MATLAB и SIMULINK.

Настроить рабочую папку по указанию преподавателя.

Открыть файлы «*param.m*» и «*A_Lab_Model_MMG_Vibr.slx*» (или «*A_Lab_Model_MMG_Vibr.mdl*», если установлена версия MATLAB ниже R2015a).

4.1.2 Ввести в файл «*param.m*» значения параметров, соответствующие типу гироскопа «ММГ-2» (см п. 3).

4.1.3 Ввести в файл «*param.m*» следующие значения параметров: $pe = 0$ – отключает в модели взаимосвязь с ПЭ; $\delta_{DU} = 0,9$ и $\delta_{DM} = 0,9$ – задает значение неравенства площадей ДУ и ДМ соответственно.

4.1.4 Определить амплитуды и частоты субгармонических резонансов.

Ввести в файл «*param.m*» значение амплитуды вибрации в направлении оси Z $W = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Остальные параметры внешних воздействий должны быть равны нулю. Запустить моделирование и получить график выходного сигнала с блока OUT (8, рис. 4) (выходной сигнал записывается в рабочей папке в файл «*0_out.mat*»). Определить амплитуды и частоты субгармонических резонансов. Используя инструменты MATLAB, определить среднее значение в выходном сигнале.

Подсказка. Действующая частота определяется из выражения $\nu = (t - 1) \cdot 1000$ (где t – время моделирования, с). Для определения среднего значения используйте операторы *load* и *mean* при обработке файла временных рядов «*0_out.mat*».

4.1.5 Определить зависимость амплитуды субгармонического резонанса на половинной частоте первичных колебаний от:

- значения δ_{DM} , варьируя его от 0,9 до 1,1 с шагом 0,05;
- значения δ_{DU} , варьируя его от 0,9 до 1,1 с шагом 0,05.

Примечание. При изменении δ_{DM} , δ_{DU} принять равным 0,9 и наоборот. Для графического представления зависимостей используйте MS Excel.

4.1.6 Ввести в файл «*param.m*» начальные значения параметров δ_{DU} и δ_{DM} .

4.1.7 Определить зависимость амплитуды субгармонического резонанса на половинной частоте первичных колебаний и среднего

значения в выходном сигнале от амплитуды действующей вибрации W , варьируя ее от 2 до 10 g с шагом 2 g.

4.1.8 Определить наличие и частоты субгармонических резонансов при воздействии вибрации по осям X и Y .

В файле «*param.m*» ввести значение амплитуды вибрации в направлении оси X $W_x = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Остальные параметры внешних воздействий должны быть равны нулю. Запустить моделирование.

В файле «*param.m*» ввести значение амплитуды вибрации в направлении оси Y $W_y = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Остальные параметры внешних воздействий должны быть равны нулю. Запустить моделирование.

Сравнить результаты и сделать выводы.

4.1.9 Проверить влияние перекрестных связей.

Ввести в файл «*param.m*» значение амплитуды вибрации $W_x = 98 \text{ м/с}^2$ (1 g), $W_y = 98 \text{ м/с}^2$ (1 g), $W_z = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Остальные параметры внешних воздействий должны быть равны нулю. Запустить моделирование. Сделать выводы.

4.1.10 Вычислить ошибку в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте.

Ввести в файл «*param.m*» значение амплитуды угловой скорости вокруг оси Y $\Omega_y = 1,74 \text{ рад/с}$ ($100 \text{ }^\circ/\text{с}$) и амплитуды вибрации в направлении оси Z $W_z = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Открыть подсистему внешних воздействий (3, рис. 4). Установить переключатель (1а, рис. 5) в положение, соответствующее воздействию ускорения с постоянной частотой. Запустить моделирование и получить график выходного сигнала с блока OUT. Используя инструменты MATLAB, вычислить ошибку в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте.

4.1.11 Ввести в файл «*param.m*» параметры, соответствующие типу гироскопа «ММГ-ЭП» (см п. 3). Повторить моделирование по п. 4.1.4. Сделать выводы.

4.2 Исследование динамики микромеханического гироскопа с подвижным электродом

4.2.1 Ввести в файл «*param.m*» значения параметров, соответствующие типу гироскопа «ММГ-2» (см п. 3).

4.2.2 Включить в модели взаимосвязь с ПЭ и ввести значения неравенств площадей ДУ и ДМ, равными 0,9.

4.2.3 Ввести отношение $\delta\omega$ собственных частот ПЭ и ИТ, равное 1, в параметр *delta_w*.

4.2.4 Определить амплитуды и частоты субгармонических резонансов.

Ввести в файл «*param.m*» значение амплитуды вибрации в направлении оси Z $W_z = 980 \text{ м/с}^2$ (10 g). Остальные параметры внешних воздействий должны быть равны нулю. Запустить моделирование и получить график

выходного сигнала с блока OUT. Определить амплитуды и частоты субгармонических резонансов. Используя инструменты MATLAB, определить среднее значение в выходном сигнале.

4.2.5 Определить наличие и частоты субгармонических резонансов при воздействии вибрации в направлении осей X и Y. Проверить влияние перекрестных связей, задав воздействие вибрации в направлении Z с амплитудой 10 g, а в направлениях X и Y – 1 g.

4.2.6 Определить зависимость амплитуды субгармонического резонанса на половинной частоте первичных колебаний при воздействии вибрации в направлении Z с амплитудой 10 g от значения $\delta\omega$, варьируя его от 0,95 до 1,05 с шагом 0,02.

4.2.7 Вычислить ошибку в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте.

Ввести в файл «*param.m*» значение амплитуды угловой скорости вокруг оси Y $\Omega_y = 1,74$ рад/с (100 °/с) и амплитуды вибрации в направлении оси Z $W_z = 980$ м/с² (10 g). Открыть подсистему внешних воздействий. Установить переключатель в положение, соответствующее воздействию ускорения с постоянной частотой. Запустить моделирование и получить график выходного сигнала с блока OUT. Используя инструменты MATLAB, вычислить ошибку в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте.

4.2.8 Определить зависимость ошибки в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте, от значения $\delta\omega$, варьируя его от 0,95 до 1,05 с шагом 0,02.

4.2.9 Ввести в файл «*param.m*» параметры, соответствующие типу гироскопа «ММГ-ЭП» (см п. 3). Повторить моделирование по п. 4.2.4. Сделать выводы.

5 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчет о лабораторных исследованиях выполняется в электронном виде и должен содержать:

- структурную схему исследуемой системы;
- модель системы в пакете Simulink;
- исходные данные для имитационного моделирования;
- полученное значение амплитуды выходных колебаний ММГ;
- полученные зависимости ошибки в выходном сигнале, вызванную вибрацией на одной частоте, от изменения значения $\delta\omega$.

6 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении лабораторной работы следует руководствоваться ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

Студенты допускаются к выполнению лабораторной работы только после проведения преподавателем инструктажа по вопросам безопасности и методики выполнения работы с обязательной отметкой в соответствующем журнале по технике безопасности.

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое субгармоники?
2. Чем обусловлены нелинейности в системе управления ММГ RR-типа?
3. Как влияет неравенство площадей ДУ и ДМ на выходной сигнал?
4. Как влияют перекрестные взаимодействия при воздействии поступательных вибраций?
5. Как влияют перекрестные взаимодействия при воздействии угловой скорости?
6. Как влияет воздействие поступательных вибраций на частоте первичных колебаний на выходной сигнал?
7. Что такое подвижный электрод?
8. В каком случае обеспечивается максимальная эффективность подвижного электрода?
9. Как влияет соотношение собственных частот колебаний ИТ и ПЭ на выходной сигнал ММГ?
10. Как изменяется ошибка определения угловой скорости, вызванная вибрацией, от соотношения собственных частот колебаний ИТ и ПЭ?

8 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пешехонов, В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1. – С.3-16.
2. **Пешехонов, В.Г.** Отечественный микромеханический гироскоп RR-типа. Современное состояние и перспективы /В.Г. Пешехонов [и др.]// Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2012. – №19. – С.108-114.
3. **Barbour, N.** Inertial MEMS System Applications /N. Barbour [et al.]// Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12.
4. **Geen, J.** Progress in Integrated Gyroscopes // IEEE A&E Systems magazine – November, 2004. – pp. 12-17.
5. **Weinberg, H.** Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. Analog Devices, Inc. – September 2011. – pp.1-5.
6. **Nguyen, C.** The Harsh Environment Robust Micromechanical Technology (HERMiT) Program: Success and Some Unfinished Business // Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, June 2012, pp. 1-3.
7. **Евстифеев, М.И.** Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – №1. – С.119-133.
8. **Евстифеев, М.И.** Исследование электромеханической модели микромеханического гироскопа R-R типа с учетом вибраций основания /М.И. Евстифеев, А.С. Ковалев, Д.П. Елисеев// Гироскопия и навигация. – 2013. – №.3. – С.24-32.
9. **Елисеев, Д.П.** Исследование влияния линейных вибраций на ММГ RR типа с учетом нелинейности емкостных датчиков /Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2014. – С 406-412.
10. **Евстифеев, М.И.** Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям/ М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, Челпанов// Гироскопия и навигация. – 2014. – №.4. – С. 56-68
11. **Евстифеев М. И.** Микромеханический гироскоп RR-типа с подвижным электродом / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2015. – №.4. – С.62-71.
12. **Патент 2561006** Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев ; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2014123821/28 ; заявл. 10.06.2014 ; опубл. 20.08.2015 ; Бюл. № 23. – 9 с. : ил.
13. **ADXRS646.** High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope / Data Sheet. AnalogDevices. 2012. – 12 p.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.



КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Кафедра информационно-навигационных систем является одной из старейших в университете.

В 30-е гг. XX века отечественная промышленность приступила к созданию новых навигационных приборов – гирокомпасов, лагов, эхолотов. В связи с этим в 1934 г. рядом предприятий и организаций было внесено предложение во Всесоюзный совет народного хозяйства (ВСНХ) СССР о подготовке необходимых инженерных кадров. В сентябре 1937 г. была создана кафедра навигационных приборов. С 1937/38 учебного года на кафедре была начата подготовка специалистов.

Первым заведующим кафедрой стал профессор Л.П. Шишелов, занимавший то время должность декана факультета «А» (точной механики).

С 1945 г. по 1962 г. кафедрой возглавлял крупный ученый в области навигации, гидрографии, штурманских приборов, доктор технических наук, профессор К.С. Ухов. При нем в 1956 г. в связи с изменением номенклатуры специальностей кафедры была переименована в кафедру гироскопических и навигационных приборов.

С 1963 г. по 1970 г. кафедрой заведует (по совместительству) главный инженер Ленинградского научно-производственного объединения «Азимут», лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор С.Ф. Фармаковский. В этот период коллектив кафедры значительно укрепил и расширил связи с промышленностью.

В 1970 г. избирается по конкурсу заведующим кафедрой д.т.н., профессор М.А. Сергеев и руководит ею до 1982 г. В промышленности ведутся работы по созданию космических летательных аппаратов, сверхзвуковых самолетов, атомных подводных лодок, межконтинентальных ракет. В этих условиях кафедра расширяет профиль подготовки специалистов и в 1973 г. переименовывается в кафедру бортовых приборов управления.

С 1982 г. по 1991 г. кафедрой возглавляет профессор В.А. Каракашев, создавший совместно со своими учениками О.Н. Анучиным и Г.И. Емельянцевым (впоследствии доктора наук) научно-педагогическую школу «Инерциальные навигационные системы». На кафедре ведутся

научно-исследовательские работы совместно и по заказам навигационно-гидрографического института, ЦНИИ «Электроприбор», завода «Баррикада» в Волгограде.

С 1991 г. кафедру возглавляет директор ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» (в настоящее время АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»), лауреат Ленинской и Государственной премий, в то время член-корреспондент, впоследствии академик РАН В.Г. Пешехонов. Под руководством В.Г. Пешехонова кафедра ориентируется на подготовку специалистов в области создания приборов и систем, измеряющих перемещения, скорости и ускорения морских подвижных объектов и образующих интегрированные навигационно-управляющие комплексы судов и кораблей различного назначения, а также комплексы пространственной ориентации и стабилизации информационно-измерительной аппаратуры на их борту. В апреле 2003 г. кафедра получила свое современное наименование – она была переименована в кафедру информационно-навигационных систем.

По инициативе академика В.Г. Пешехонова, начиная с 2004/05 учебного года, студенты и преподаватели кафедры активно включаются в межвузовскую программу интенсивной подготовки специалистов, которая реализуется на базе ЦНИИ «Электроприбор». С этой целью между ЦНИИ «Электроприбор» и тремя ведущими университетами города (СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГУ ИТМО и СПб ГУАП) заключается и успешно реализуется Соглашение о межвузовской углубленной подготовке инженерных кадров и проведении совместных научных исследований в области навигации на базе ЦНИИ «Электроприбор». В сентябре 2008 г. кафедра преобразуется в базовую при ЦНИИ «Электроприбор».

За работы в области объединения усилий вузов при подготовке специалистов коллективу, в состав которого вошли профессора СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» Ю.В. Филатов и Ю.А. Лукомский, а также д.т.н. О.А. Степанов (ЦНИИ «Электроприбор»), в 2010 г. присуждается Премия Правительства Санкт-Петербурга «За выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования за 2010 г.» в области интеграции образования, науки и промышленности.

В 2011 г. в ЦНИИ «Электроприбор» открывается новый комплекс учебных помещений, включающий лабораторию, компьютерный класс и зону отдыха для студентов. Лаборатория, оснащенная современным оборудованием для проведения лабораторных работ, фактически является центром коллективного пользования для ведущих вузов города, готовящих специалистов в области навигации и управления.

В настоящее время на кафедре созданы все необходимые условия для освоения важной профессии, связанной с созданием информационно-навигационных систем, и проведением в этой области научных исследований на современном уровне.

Евстифеев Михаил Илларионович
Елисеев Даниил Павлович

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА НА
ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе