



МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Студенческая научная весна  
Аэрокосмический факультет



25 апреля 2023

"Верификация методики подавления влияния  
инструментальных погрешностей локально инвариантным  
масштабированием физической модели угловой  
стабилизации летательного аппарата"

Руководители:

**Симоньянц Р.П.**, к.т.н., доцент каф. СМ-2

**Пилипчук С.В.** ассистент преподавателя каф. СМ-2

Автор(ы):

**Воронин Е.И.** студент группы АК2-101

**Рыбаков А.В.** студент группы АК2-101

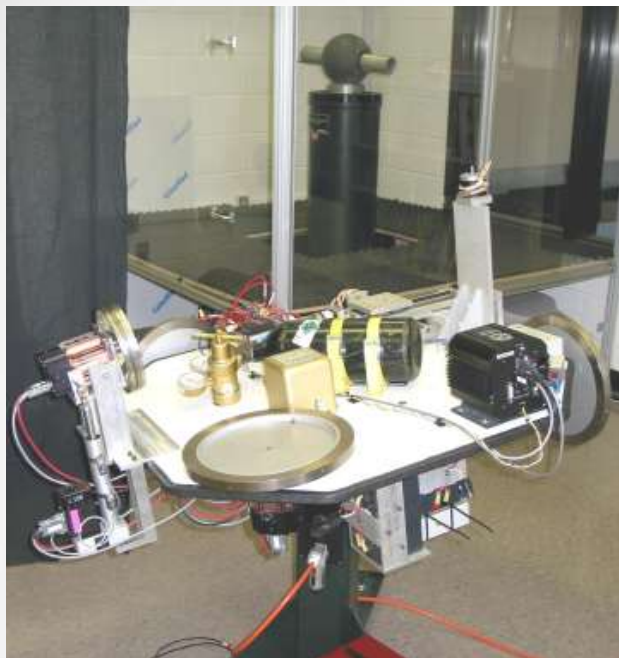
**Цыганов Г.И.** студент группы АК2-101

Москва, 2023

# Проблема

Стенды физического моделирования, предназначенные для тестирования элементов СУД КА, не пригодны для изучения автоколебательных режимов углового движения корпуса КА в естественном масштабе параметров, поскольку инструментальные возмущения лабораторных установок, обусловленные несовершенством их конструкции, качественно искажают форму динамических процессов, реализующихся в условиях космического полета, для которых характерны малые величины управляющих и возмущающих воздействий и высокие требования к точности поддержания ориентации.

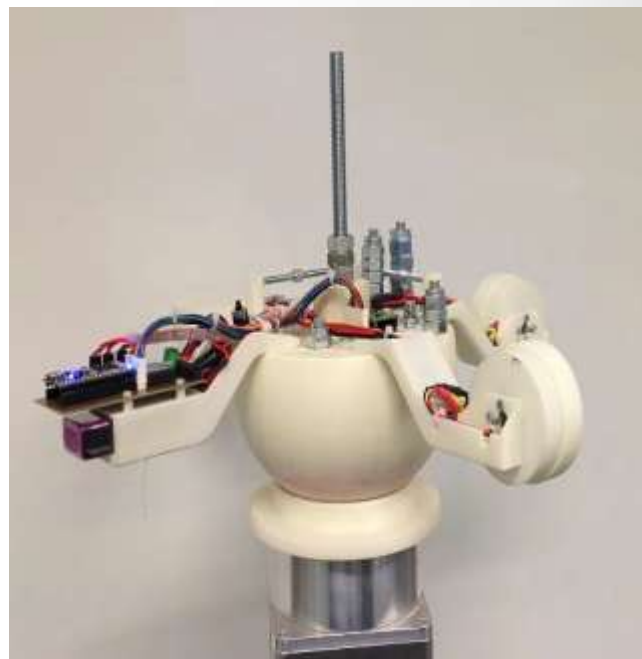
# Актуальность проблемы



**Стенд на аэродинамическом  
подвесе университета  
штата Вирджиния (США)**



**Стенд на магнитном подвесе  
Швейцарского  
центра электроники и  
микротехнологии**



**Стенд на  
аэродинамическом подвесе  
Мюнхенского  
университета прикладных  
наук**

# Задача

Задачей настоящего исследования является верификация методики подавления инструментальных возмущений с применением принципа локально-инвариантного масштабирования, впервые предложенной Р.П. Симоньянцем и соавторами в статье [1].

Требуется экспериментально получить основные формы динамических режимов редуцированной модели движения КА на стенде физического моделирования.

# Математическая модель углового движения КА

В качестве примера в статье [1] рассмотрена редуцированная одноканальная система управления ориентацией и стабилизации корпуса космического аппарата в канале тангажа с линейным формированием управляющего сигнала, трехпозиционным реле с гистерезисом и постоянным внешним возмущающим моментом.

Математическая модель движения КА представлена в виде:

$$\begin{cases} J_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = M_v - M_p F(\sigma), \\ F(\sigma) = 1/2 [\operatorname{sgn}(\sigma - \alpha + h \cdot F_0) + \operatorname{sgn}(\sigma + \alpha + h \cdot F_0)], \\ \sigma = x + k \cdot y, \end{cases}$$

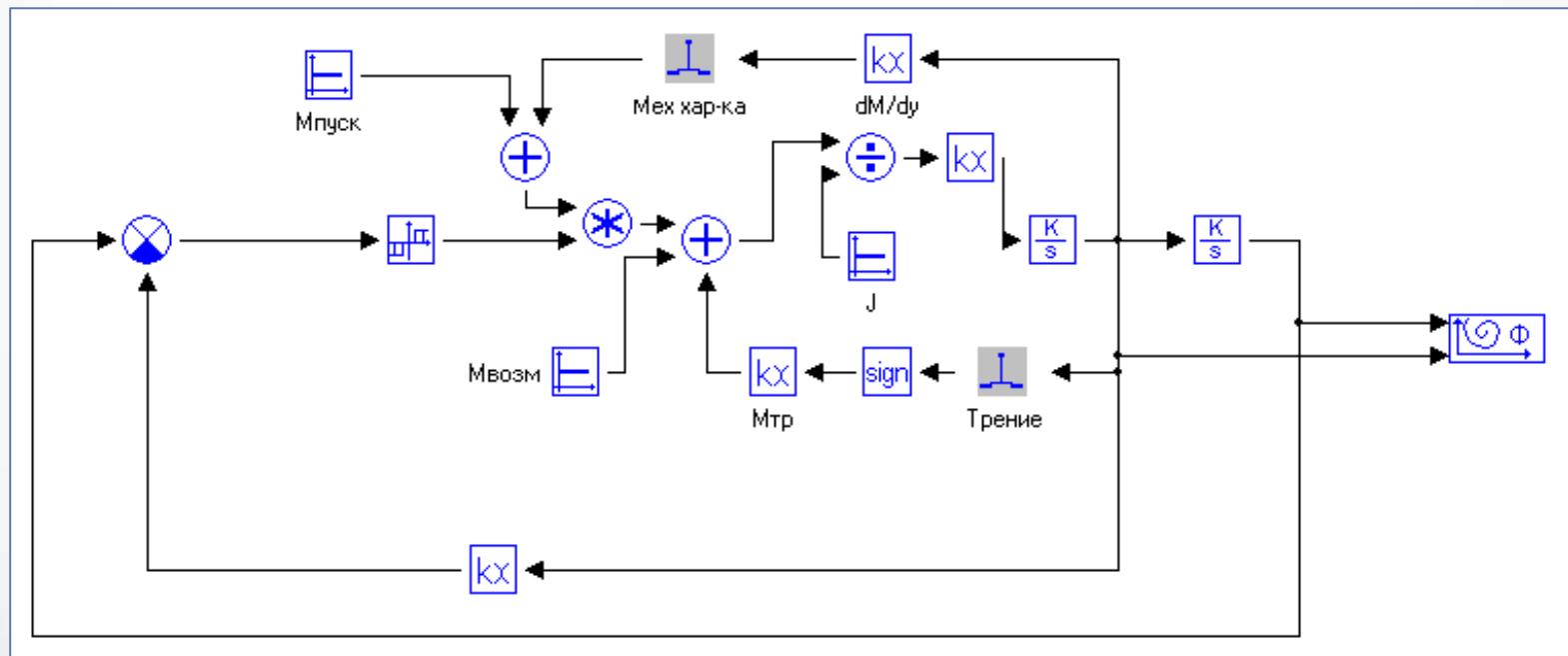
С начальными условиями при  $t = 0$   $x = x_0$   $y = y_0$   $F = F_0$   
где  $x$  – угловое отклонение,  $y$  – угловая скорость,  $\sigma$  – управляющий сигнал,  $\alpha$  – порог срабатывания регулятора,  $h$  – ширина петли гистерезиса,  $F$  – управляющая функция,  $k$  – коэффициент усиления,  $J$  – момент инерции,  $M_p$  – управляющий момент,  $M_v$  – возмущающий момент,  $a = M_p / J$ ,  $g = M_v / J$ .

# Математическая модель движения стенда ФМ

$$\begin{cases} J_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = M_b - M_p F(\sigma) + M_{тр}, \\ F(\sigma) = 1/2 [\operatorname{sgn}(\sigma - \alpha + h \cdot F_0) + \operatorname{sgn}(\sigma + \alpha + h \cdot F_0)], \\ \sigma = x + k \cdot y, \\ M_{тр} = -\mu \cdot r \cdot R \cdot \operatorname{sgn}(y) \end{cases}$$

где

$M_{тр}$  – момент сухого трения,  
 $r$  – радиус трения подшипника,  
 $\mu$  – коэффициент трения,  
 $R$  – суммарная сила реакции в опорах вращения.



Структурная схема управления стендом ФМ

# Принцип локально-инвариантного масштабирования

$$X_i(t) = X_j(t) \quad Y_i(t) = Y_j(t)$$

$$C_x = \alpha \quad C_y = \alpha k^{-1}$$

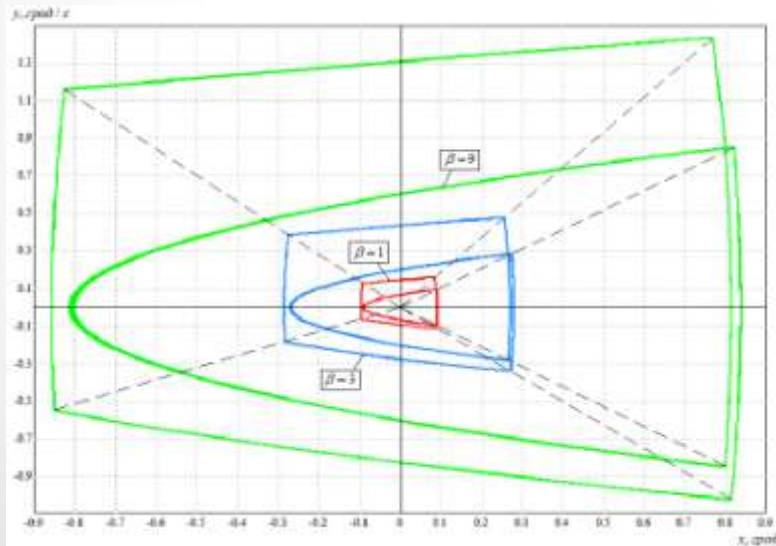
$$X(t) = \frac{x(t)}{C_x};$$

$$Y(t) = \frac{y(t)}{C_y};$$

## Линейное масштабирование

$$(\alpha, h, g, a, x_0, y_0)_1 = \beta \times (\alpha, h, g, a, x_0, y_0)_0 \quad (1)$$

$\beta$  – к-т линейного масштабирования

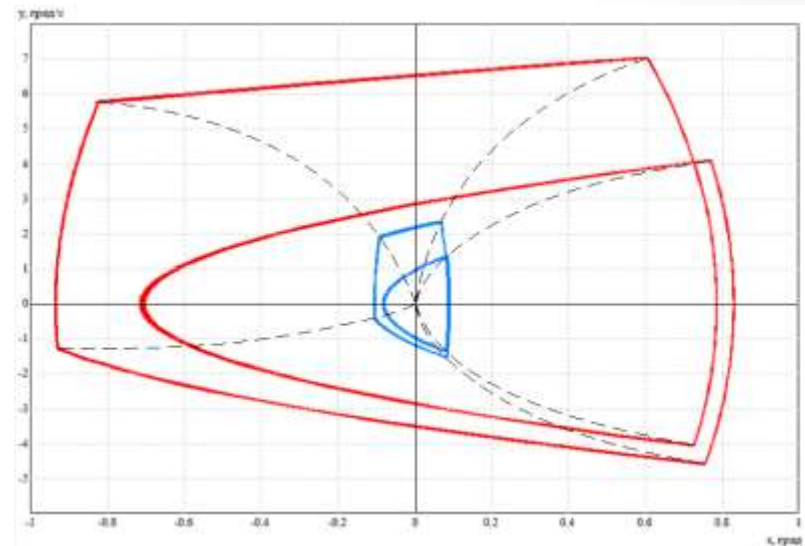


Линейное масштабирование

## Временное масштабирование

$$\begin{cases} (\alpha, h, x_0)_1 = \nu^2 \cdot (\alpha, h, x_0)_0, \\ (y_0, k)_1 = \nu \cdot (y_0, k)_0, \\ (g, a)_1 = (g, a)_0. \end{cases} \quad (2)$$

$\nu$  – к-т временного масштабирования



Временное масштабирование

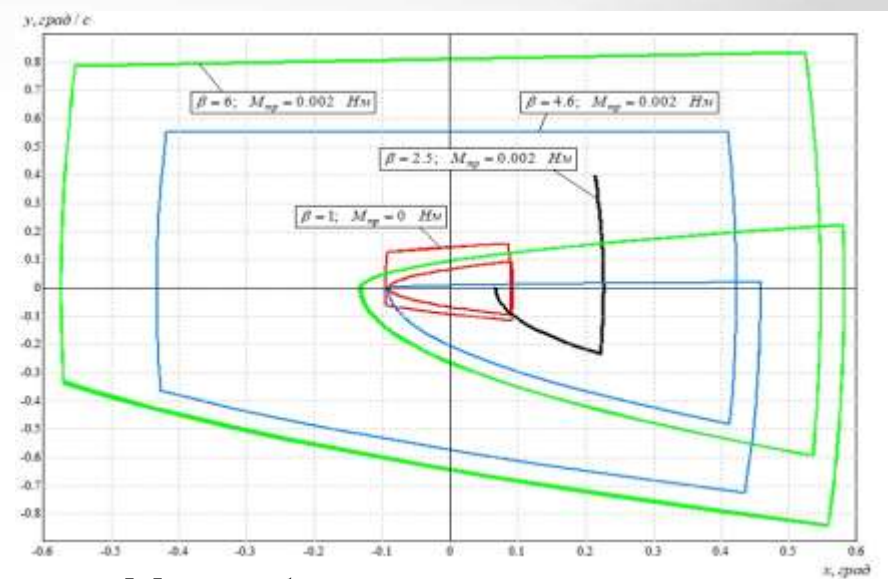
$$\frac{\delta}{g \cdot \beta} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (3)$$

$\delta = \frac{M_{\text{тр}}}{g}$  – параметр инструментального возмущения;

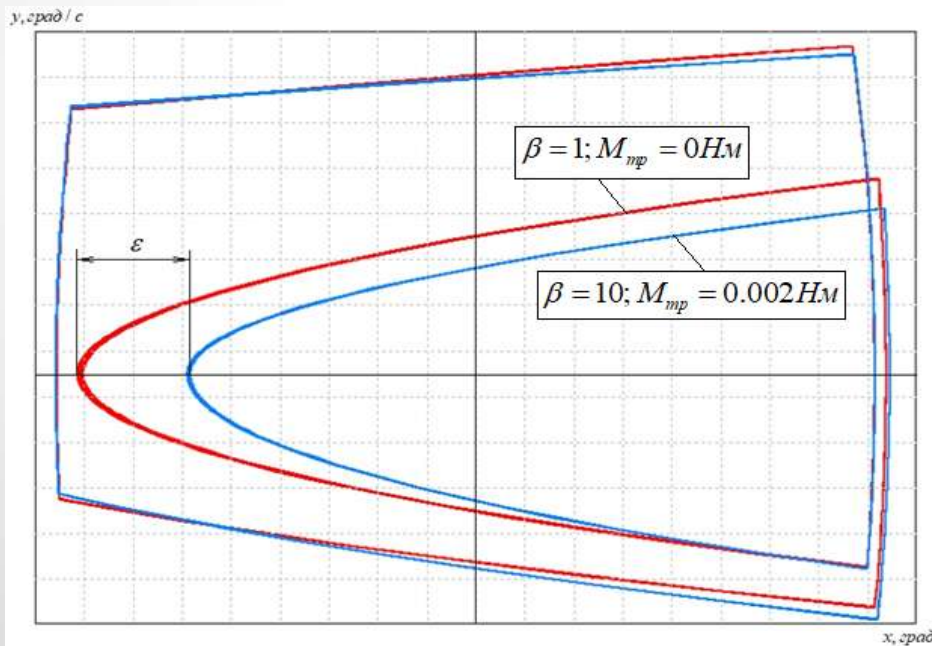
$g$  – эффективность возмущающего момента  $M\psi$ ;

$\varepsilon$  – допустимая величина погрешности воспроизведения формы предельного цикла;

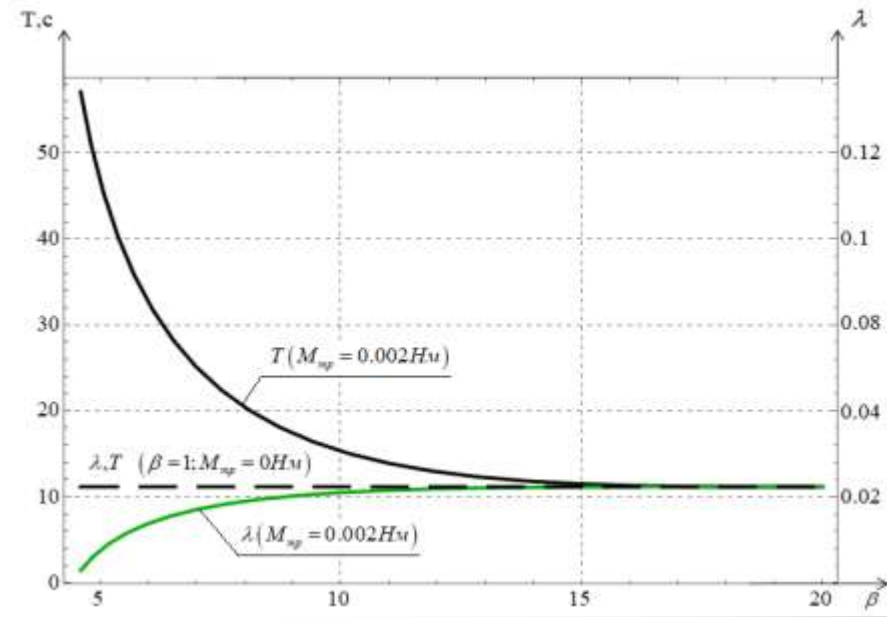
$$\beta \geq (1 + \varepsilon)(g\varepsilon)^{-1} \delta \quad (4)$$



Масштабирование системы с трением



$\varepsilon$ -подобие фазовых портретов



Номограммы параметров ПЦ:

$T$  – период,  $\lambda$  – скважность

# Стенд физического моделирования

Для верификации данной методики разработан и изготовлен стенд физического моделирования динамических режимов КА, для которого разработано специализированное программное обеспечение.

Энкодер OMRON E6B2

Аккумуляторная  
Батарея Li-Po

Гироскоп MPU 6050

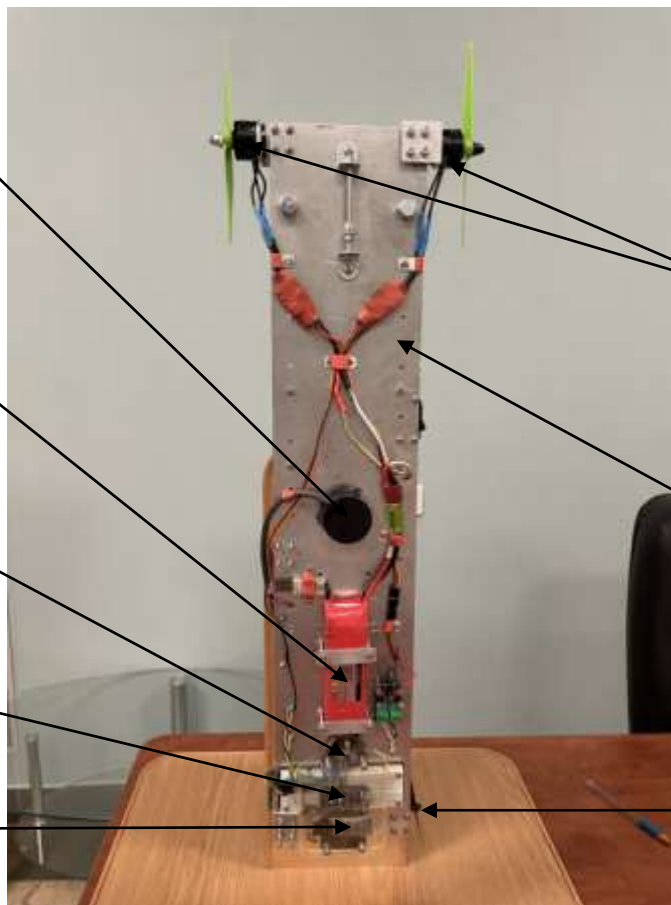
Микроконтролер  
Arduino Nano

Bluetooth-модуль h-06

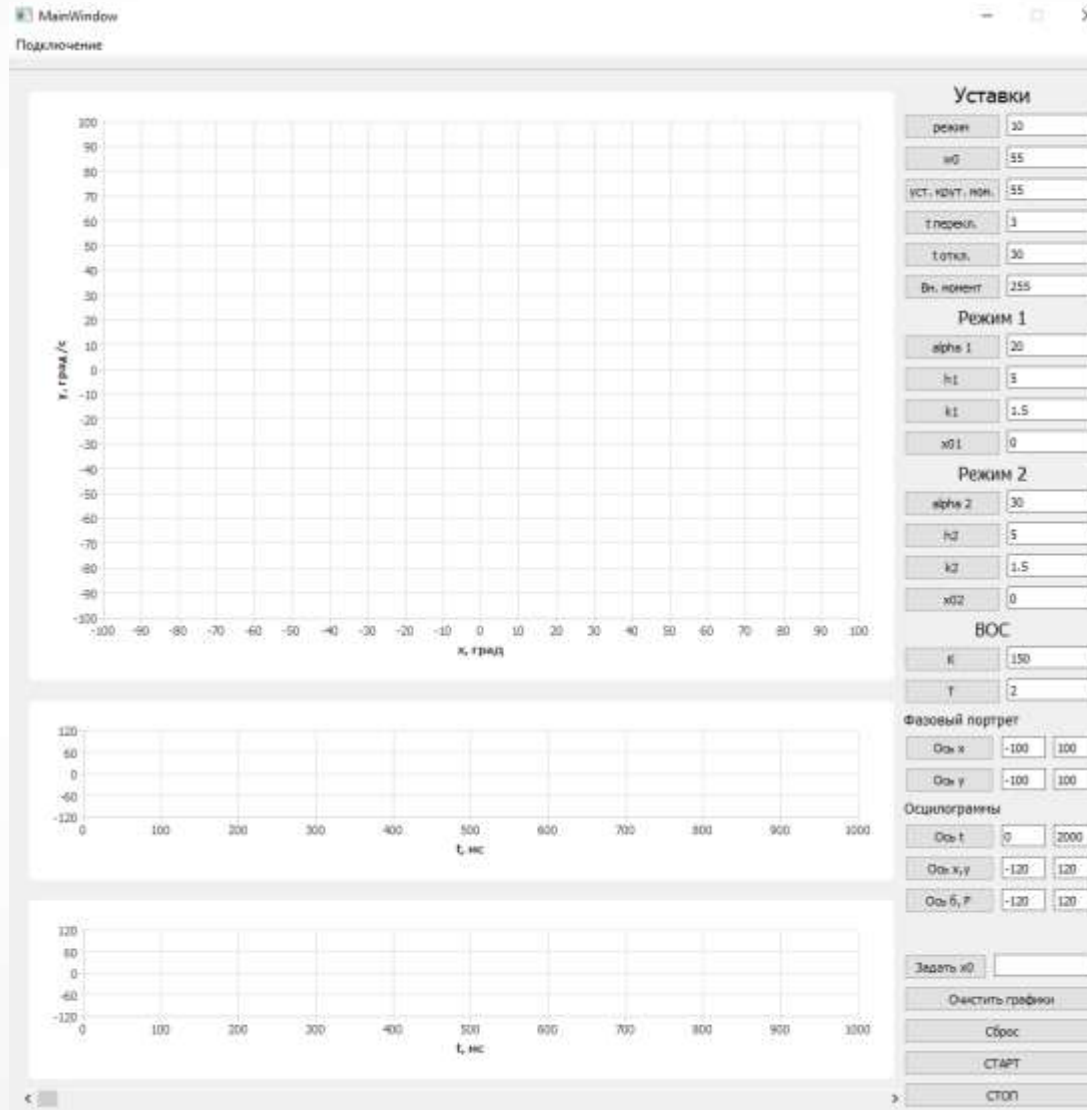
Бесколлекторные  
электродвигатели  
с воздушным  
винтом (Мр)

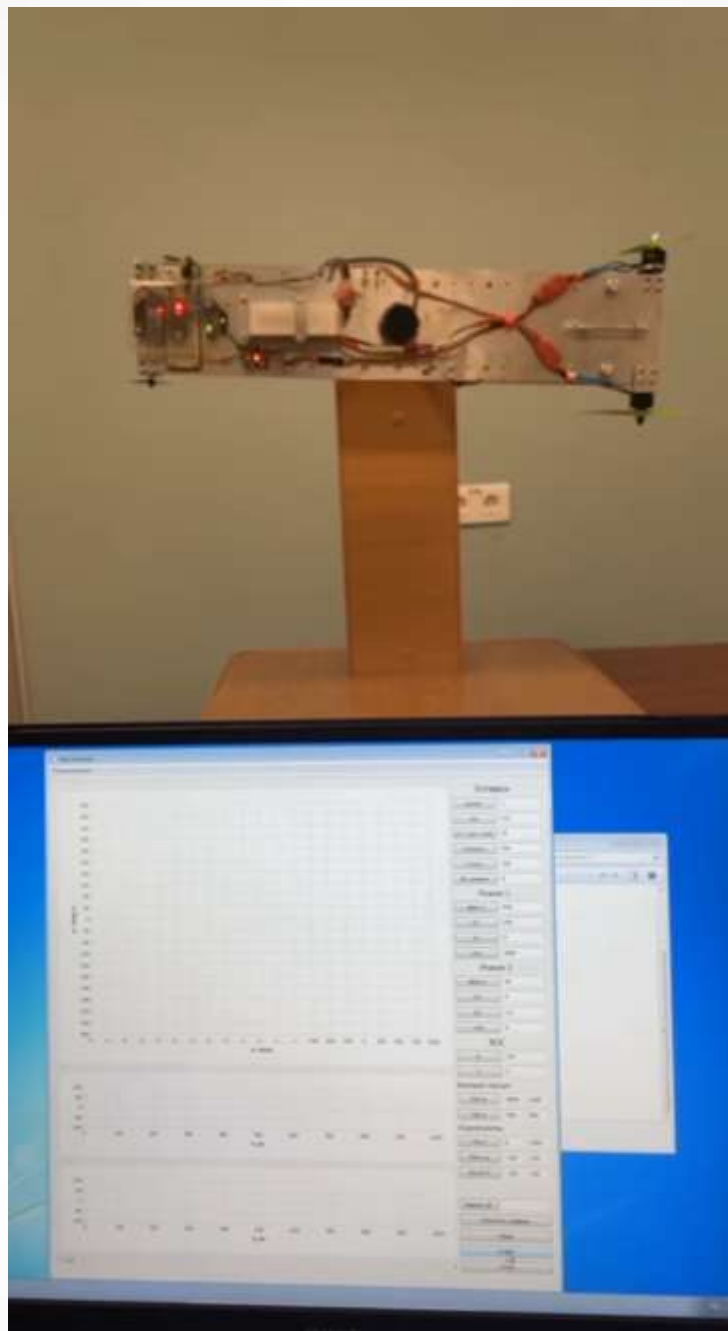
Поворотная  
платформа

Коллекторный  
двигатель (Мв)

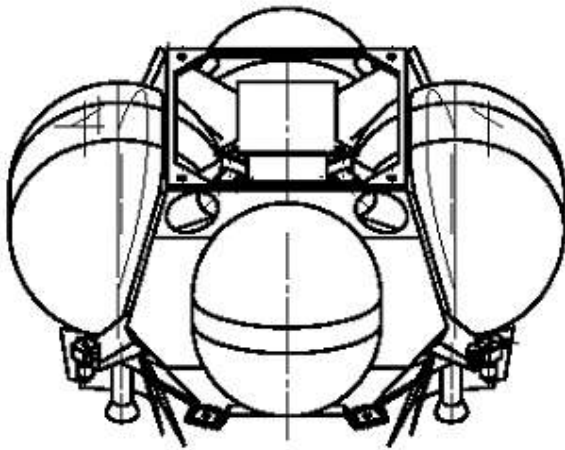


# Интерфейс разработанной программы для стенда ФМ





# Исходные данные по СУД КА

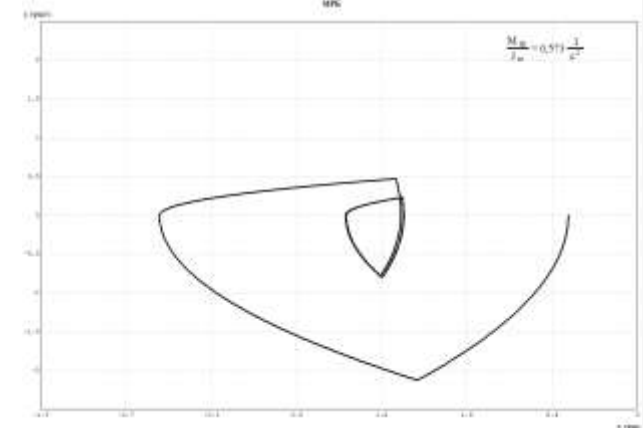
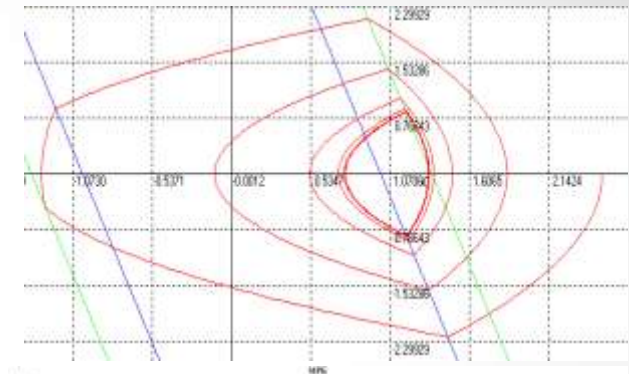


| Объект                     | МРБ «Бот» | КА «Гонец-М» | КА «Ямал-200»         |
|----------------------------|-----------|--------------|-----------------------|
| Н, км                      | 250       | 1500         | 42000                 |
| Јз, кг·м <sup>2</sup>      | 50        | 162.01       | 1014.9                |
| Мв/Мр, Нм                  | 0.268     | 0.007        | 0.0004                |
| а, рад/с <sup>2</sup>      | 0.05725   | 0.025        | $6.897 \cdot 10^{-6}$ |
| g, рад/с <sup>2</sup>      | 0.01535   | 0.0005       | $3 \cdot 10^{-8}$     |
| Точность ориентации, °     | 1         | 0.25         | 0.1                   |
| Точность стабилизации, °/с | 1.5       | 0.01         | 0.001                 |

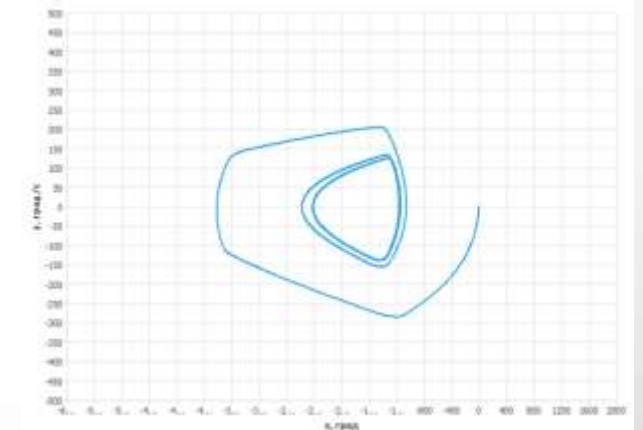
# Анализ результатов для МРБ «Бот»

| Параметр                        | МРБ «Бот» |                  |
|---------------------------------|-----------|------------------|
|                                 | КА        | Стенд ФМ         |
| $\alpha, ^\circ$                | 1.35      | 1360             |
| $h, ^\circ$                     | 0.345     | 353              |
| $a, \text{рад/с}^2$             | 0.05725   | 1.603            |
| $g, \text{рад/с}^2$             | 0.01535   | 0.311            |
| $k, \text{с}$                   | 0.203     | 2 (1.2+ $\tau$ ) |
| $\beta$                         | 1         | 28               |
| $\nu$                           | 1         | 6                |
| Тпц, с                          | 2.63      | 20.398 (3.4)     |
| $\lambda, \text{б/р}$           | 0.268     | 0.198            |
| $X_{\text{мах}}, \text{град}$   | 1.47      | 1350 (1.339)     |
| $Y_{\text{мах}}, \text{град/с}$ | 0.85      | 140 (0.833)      |
| $\varepsilon, \%$               | 0         | 9                |

Мат. моделирование



Физ. моделирование



- \*В () указаны величины после обратного масштабирования

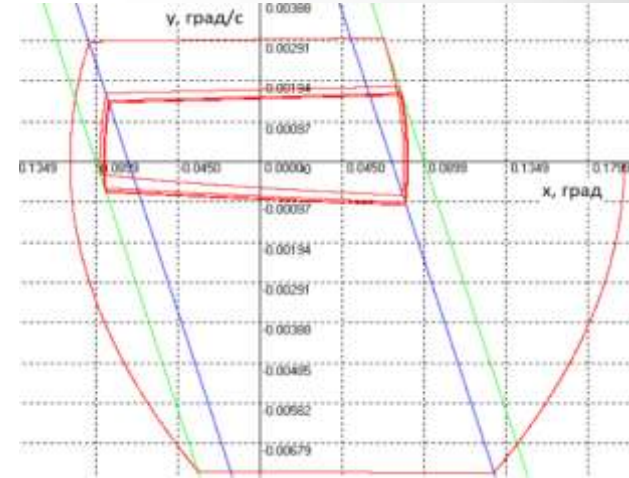
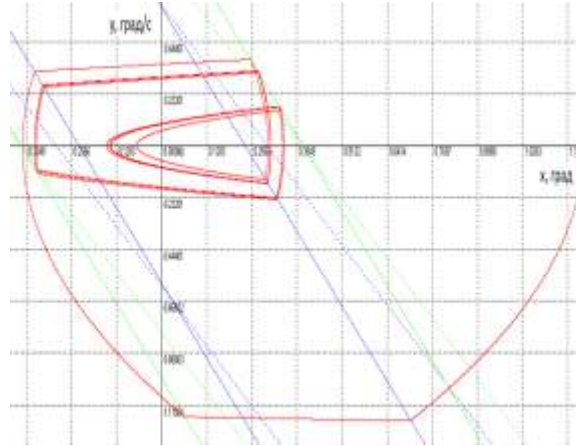
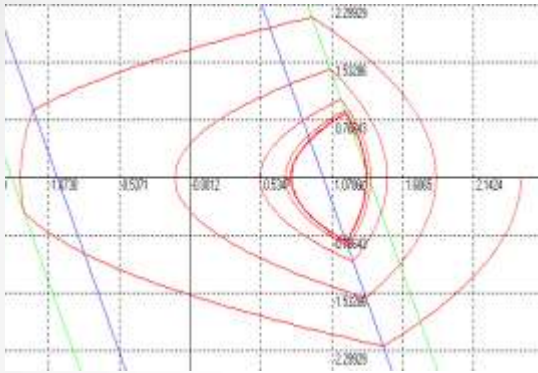
# Результаты моделирования

МРБ «Бот»

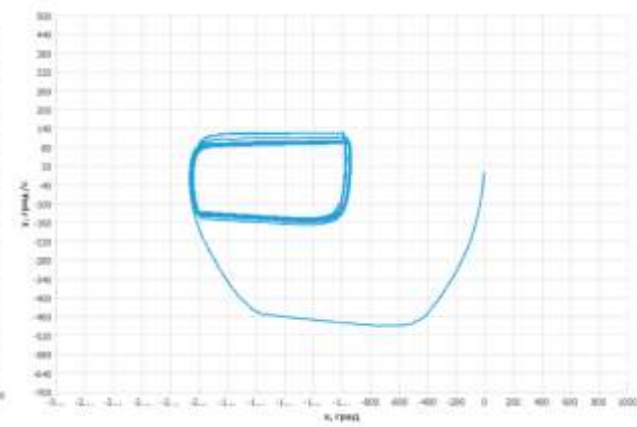
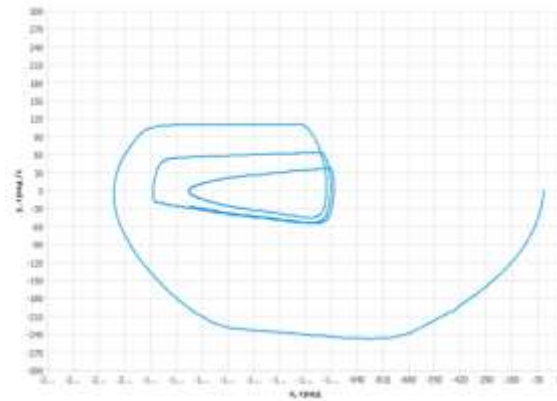
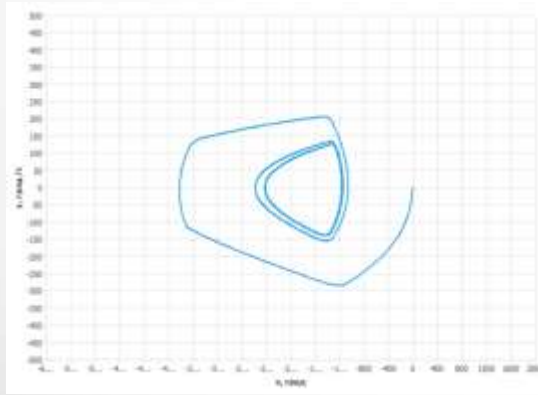
КА «Гонец-М»

КА «Ямал-200»

Мат. моделирование



Физ. моделирование



# Выводы

Применение методики локально-инвариантного масштабирования для воспроизведения режимов КА в виде сложных аттракторов с узкими параметрическими областями существования на стенде примитивной конструкции, имеющем существенные инструментальные погрешности, дало положительные результаты. Погрешность воспроизведения параметров автоколебательных процессов СУД КА составила 10-20%, что подтверждает работоспособность методики.

Влияние трения на ошибку моделирования снижено на несколько порядков.

Внедрение методики в процесс разработки ЛА с использованием более совершенных стендов позволит повысить ТТХ ЛА различных типов - улучшить точностные, энерго-массовые и экономические характеристики, а также повысить надежность систем управления движением.

# Список литературных источников

- [1]. Симоньянц Р.П., Пилипчук С.В., Шевченко В.В., Болотских А.А., Булавкин В.Н. Подавление влияния инструментальных возмущений локально инвариантным масштабированием физической модели угловой стабилизации космического аппарата. Инженерный журнал: наука и инновации, 2020, вып. 2.
- [2]. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва, Наука, 1977, 440 с.
- [3]. Борисенко А.А., Канищева М.А., Мурашко В.М., Обухов Е.В., Попов А.Н., Севастьянов Н.Н., Соколов А.В., Сухов Ю.Н. Работа электроракетных двигателей в составе двух телекоммуникационных космических аппаратов «Ямал-200» за 8 лет эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2013. № 1(70). С. 51-57.
- [4]. Севастьянов Н.Н. Создание математической модели внешних возмущающих моментов для режима «Прогноз» спутника связи «Ямал-200» // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2013. №4 (24).
- [5]. Schwartz J.L., Hall C.D. The Distributed Spacecraft Attitude Control System Simulator: Development, Progress, Plans. URL: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~canall/papers/FMS03.pdf> (дата обращения 27.10.2019).
- [6]. Rossini L., Onillon E., Chetelat O., Allegradra C. Electromagnetic force simulations on a reaction sphere for satellite attitude control. COMSOL Conference, Paris, 2010, pp. 1–4.

**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**