

### *Общие положения.*

Лабораторные работы выполняются с использованием стенда «Квадрокоптер». Работы проводятся групповым методом. В результате оформляется общий отчёт, содержащий описание оборудования, использованных программных средств, содержание выполненных исследований и выводы по каждой работе.

### *Лабораторная работа №1*

## **Знакомство со средой графического программирования LabVIEW**

**Цель работы:** Ознакомиться со средой графического программирования LabVIEW.

### **1. Программная среда LabVIEW**

LabVIEW — программная среда для разработки виртуальных приборов. На сегодняшний день LabVIEW является одной из наиболее популярных сред разработки виртуальных приборов, позволяющей ученым и инженерам осуществлять взаимодействие с большим набором оборудования и программного обеспечения. Технология виртуальных приборов является одной из революционных технологий и позволяет создавать системы измерения, управления и диагностики различного назначения практически любой сложности, включая математическое моделирование и тестирование этих систем. Суть данной технологии состоит в цифровой имитации с помощью программы реальных физических приборов, измерительных и управляющих систем.

Преимущество технологии виртуальных приборов состоит в возможности программным путем создавать разнообразные приборы, измерительные системы и программно-аппаратные комплексы, легко их адаптировать к изменяющимся требованиям, уменьшать затраты и время на разработку.

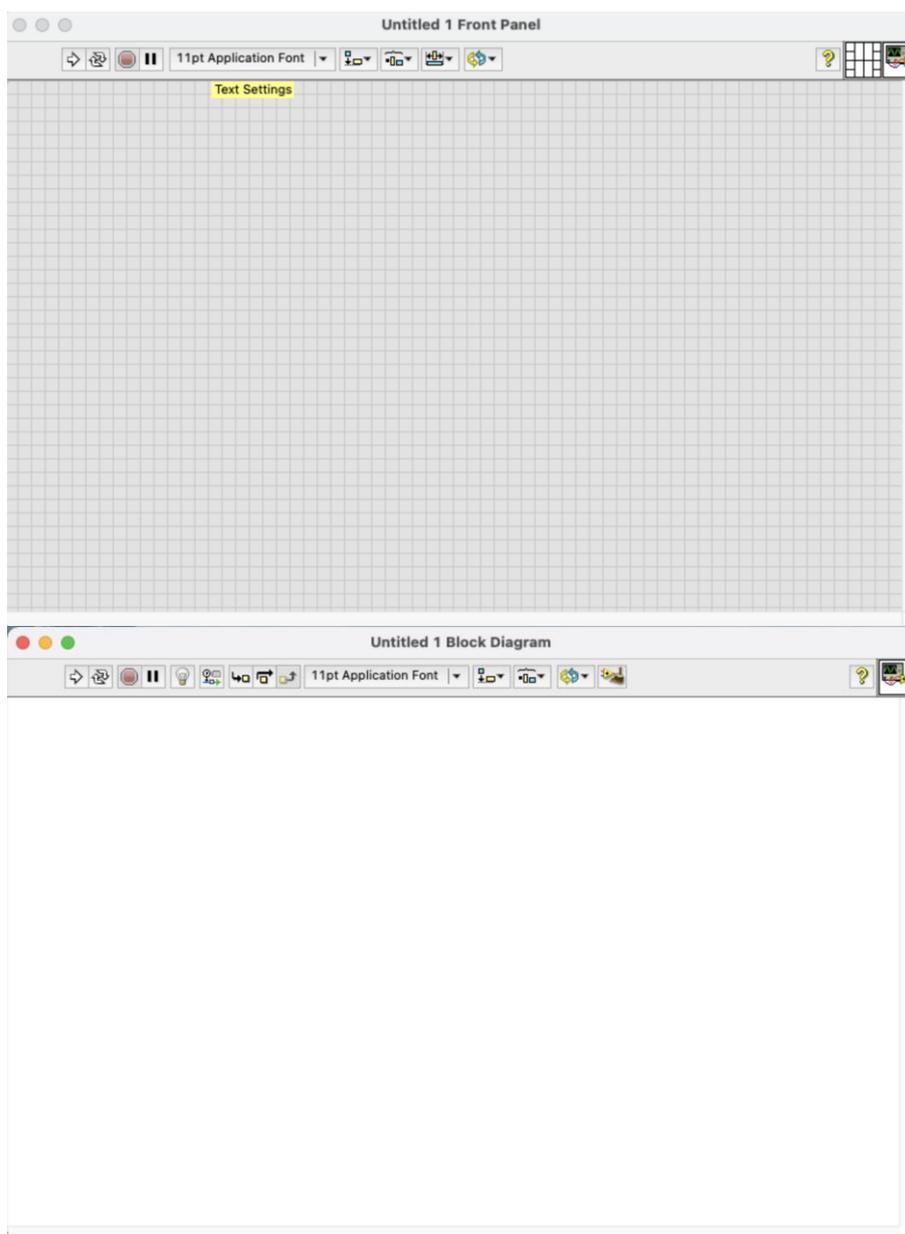
Особенности среды LabVIEW состоят в следующем:

- функционально полный язык графического программирования, позволяющий создавать программу в форме наглядной графической блок-схемы;
- встроенные программные средства для сбора данных, управления приборами и оборудованием, обработки сигналов и экспериментальных

данных, генерации отсчетов, передачи и приема данных и т.д., а также большое количество дополнительных модулей и библиотек;

- мощное математическое обеспечение, возможность интеграции программ, написанных в среде математического пакета Matlab или моделей SolidWorks;
- наличие более 2000 программ (драйверов), позволяющих сопрягать разработанную программу с разнообразными приборами и оборудованием различных фирм через стандартные интерфейсы;
- наличие большого количества шаблонов приложений, а также свыше 1000 примеров, позволяющих быстро создавать собственные программы, внося в них небольшие коррективы;
- высокая скорость выполнения откомпилированных программ.

Программу, написанную в среде LabVIEW, принято называть виртуальным прибором (ВП). У ВП есть две основные составляющие: *лицевая панель* (**Front Panel**) и *блок-схема* (**Block Diagram**).



**Рис. 1. Вид окон лицевой панели и блок-схемы**

*Лицевая панель* является графическим интерактивным интерфейсом пользователя для управления программой. На *лицевой панели* располагаются *элементы управления(ввода)* информации и *элементы отображения* (индикаторы). *Элементы управления* (регулирующие ползунки, ручки, кнопки, переключатели и т.д.) служат для ввода данных и управления виртуальным прибором. *Индикаторы* отображают данные и результаты, полученные или сгенерированные блок-схемой виртуального прибора.

С лицевой панелью связана панель элементов управления **Controls** (рис. 2,*a*). В данной панели собраны блоки элементов управления. Примечательно, что некоторые инструменты панели Controls могут служить как элементами ввода, так и элементами вывода в зависимости от настроек. Если панель отсутствует на экране, то ее можно вызвать через главное меню: **View⇒Controls Palette**.

Блок-схема представляет собой графическое изображение блоков, входящих в состав прибора, а также терминалы элементов управления, размещенных на лицевой панели. Как и в традиционной блок-схеме, сигнал в процессе обработки проходит через блоки от входа к выходу, при этом «распространение» сигнала происходит слева направо, аналогично схемам Matlab Simulink. С блок-схемой связана панель функций **Function** (рис. 2,б), которую можно вызвать через главное меню **View**⇒**Functions Palette**.

Кроме того для работы с элементами лицевой панели и блок-схемы существует палитра рабочих инструментов **Tools** (рис. 2,в), которая вызывается через главное меню **View**⇒**Tools Palette**.

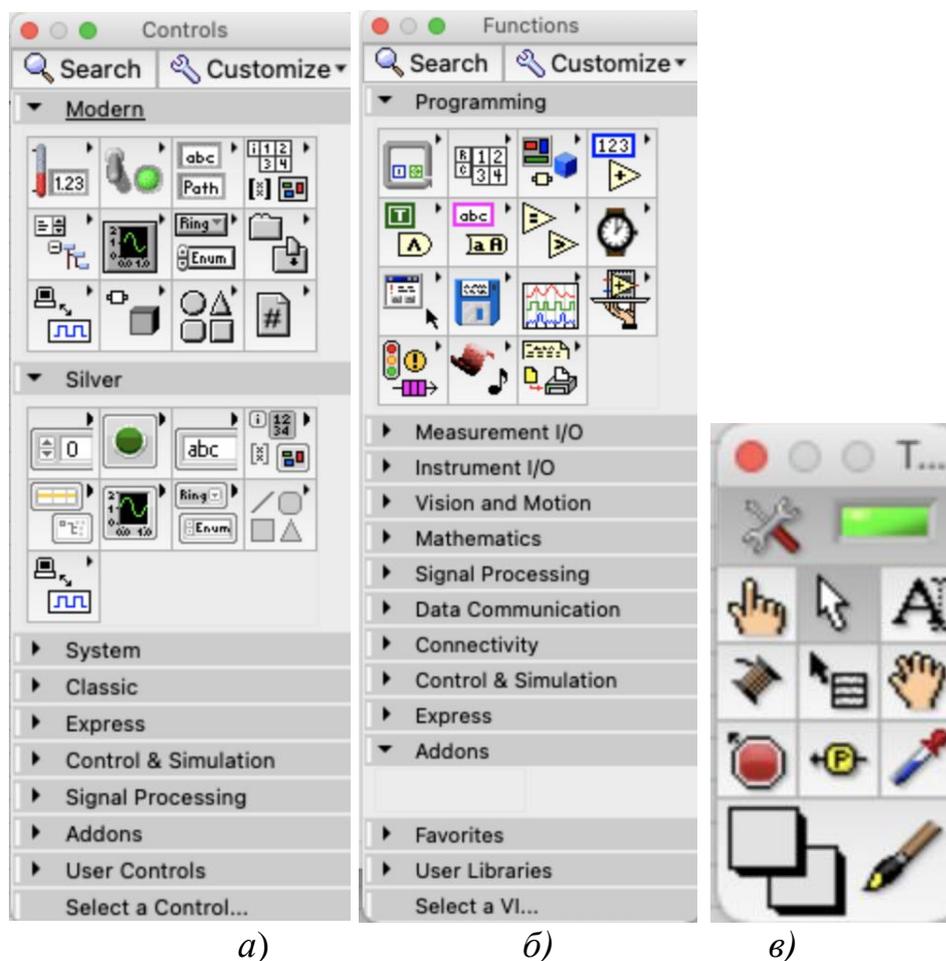


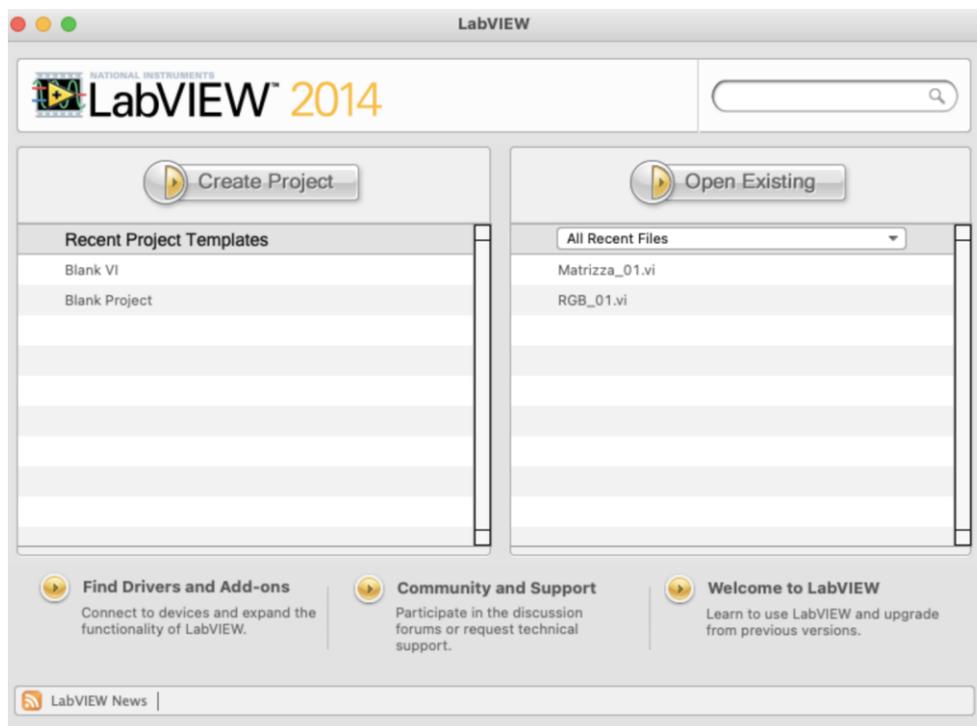
Рис. 2. Панели инструментов и соединений

## 2. Создание программы в среде LabVIEW

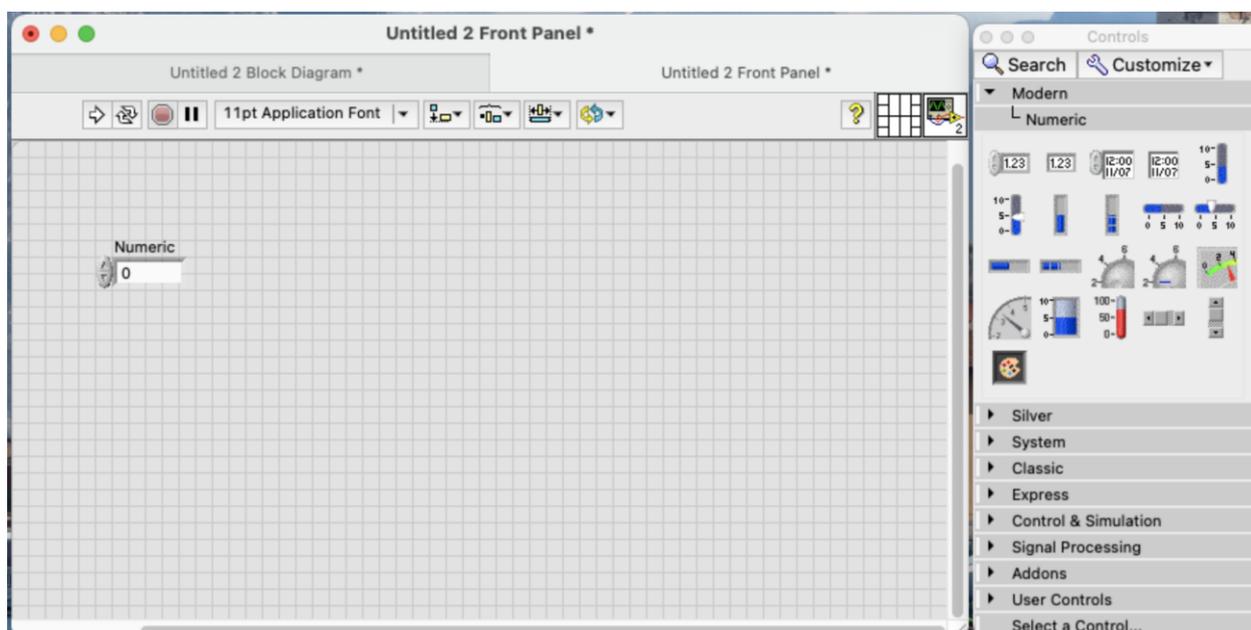
Рассмотрим простой пример создания программы для вычисления выражения следующего вида:

$$Z(x, y) = \left(\frac{y}{4} + x^2 + 2\right) \cdot e^x$$

**Шаг 1.** Запустите LabVIEW и в появившемся окне в разделе **New** выберите **Blank VI**, при этом откроется два окна: **Front Panel** – лицевая панель и **Block Diagram** – блок-схема (рис.1).



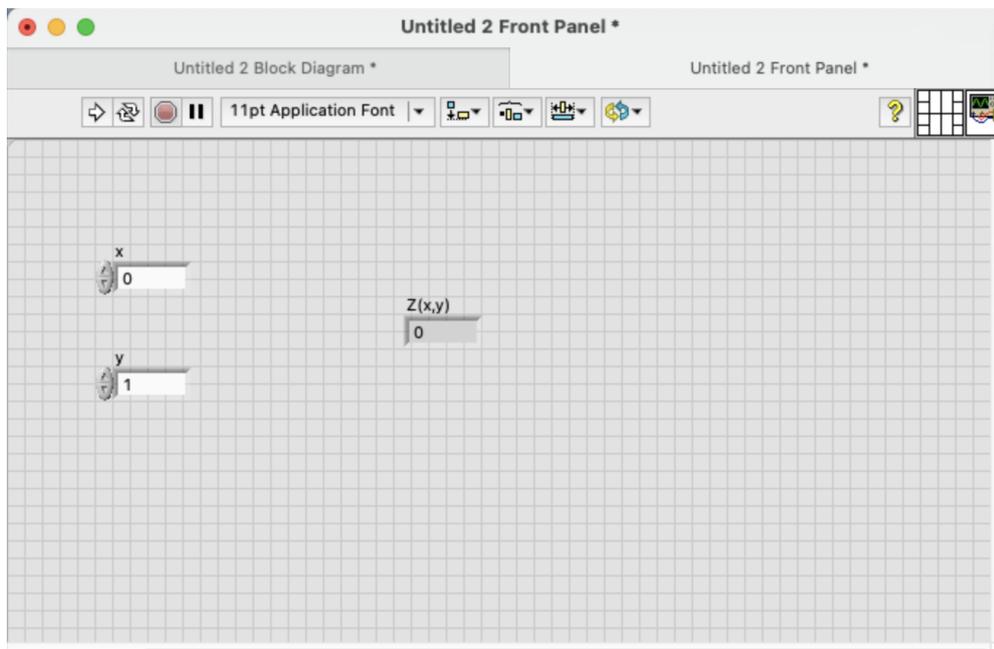
**Шаг 2.** На панели элементов управления **Controls** выберите **Modern**⇒**Numeric**⇒**Numeric Control** и установите его на лицевую панель.



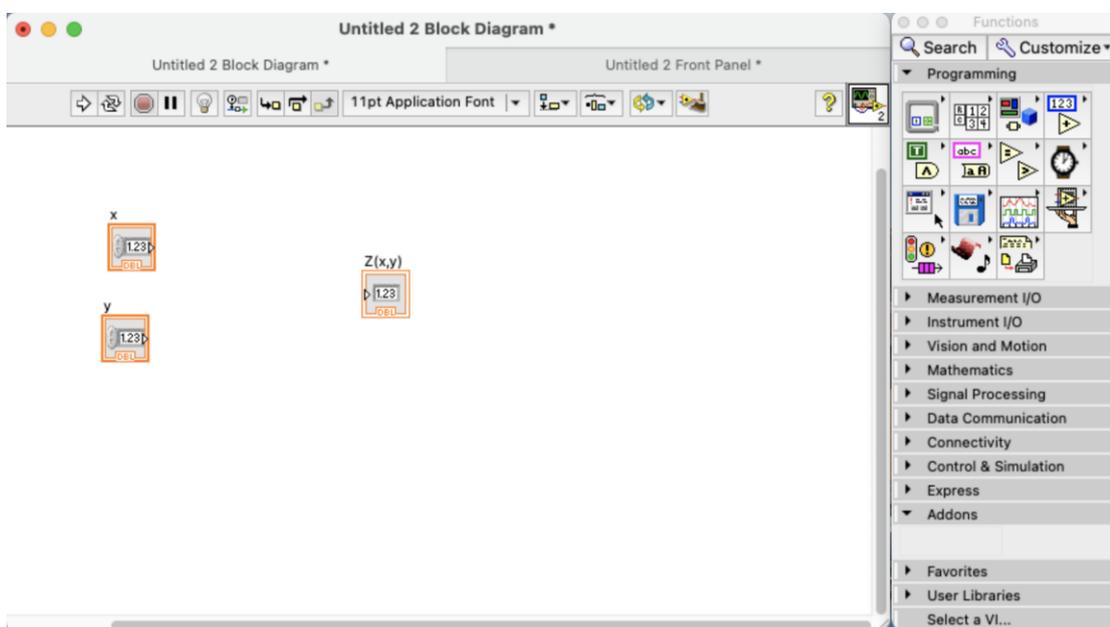
Дважды кликните по названию переменной **Numeric** и смените ее имя на **x**.

Аналогичным образом установите второй элемент **Numeric Control** и измените метку на **y**.

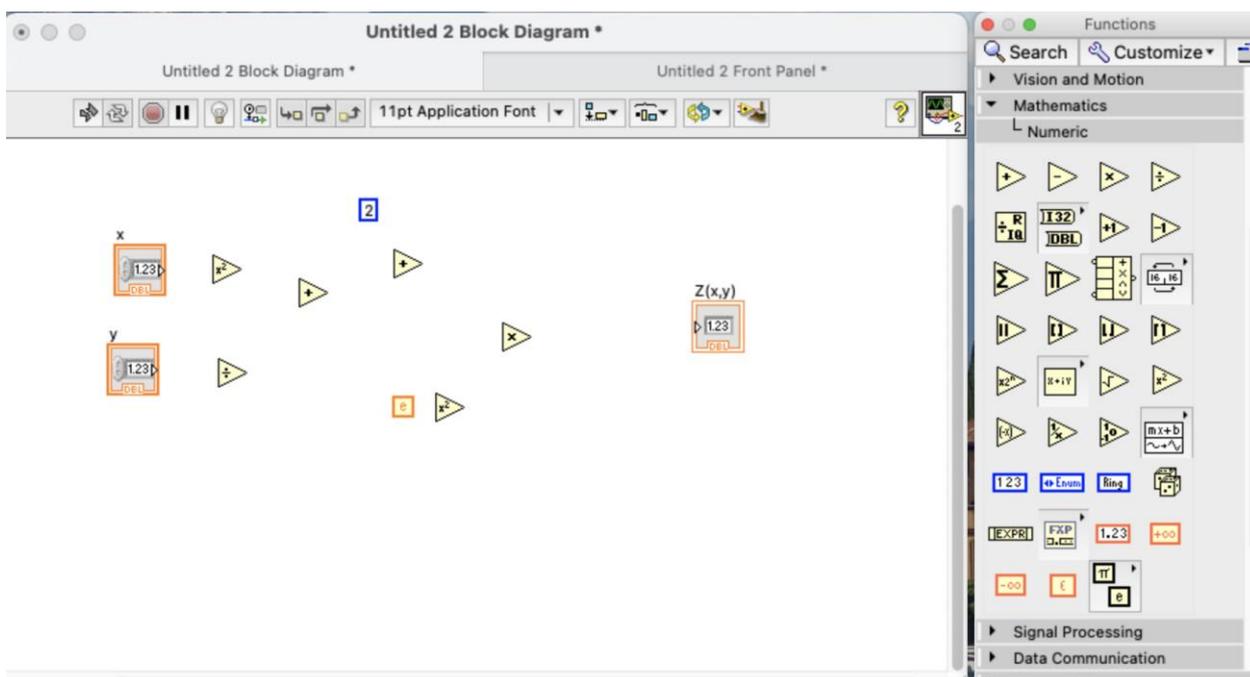
**Шаг 3.** Установите на лицевую панель элемент Numeric Indicator и измените метку на  $Z(x,y)$ .



**Шаг 4.** Переключитесь на блок-схему. Здесь Вы увидите прямоугольные терминалы, соответствующие органам управления и индикаторам лицевой панели.



Используя палитру функций **Functions**, выберите **Programming**⇒**Numeric**. Из открывшейся палитры функций выберите и установите на блок-схему элементы согласно рисунку, приведенному ниже.

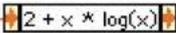


Добавить константу в схему можно с помощью блока **Numeric Constant** (целочисленный формат) или **DBL Numeric Constant** (формат числа с плавающей запятой).

В блоке **Math&Scientific Constants** находятся некоторые физические и математические константы, а также все виды логарифмов.

С помощью блока **Expression Node**  можно реализовать следующие функции:

#### Expression Node

input  output

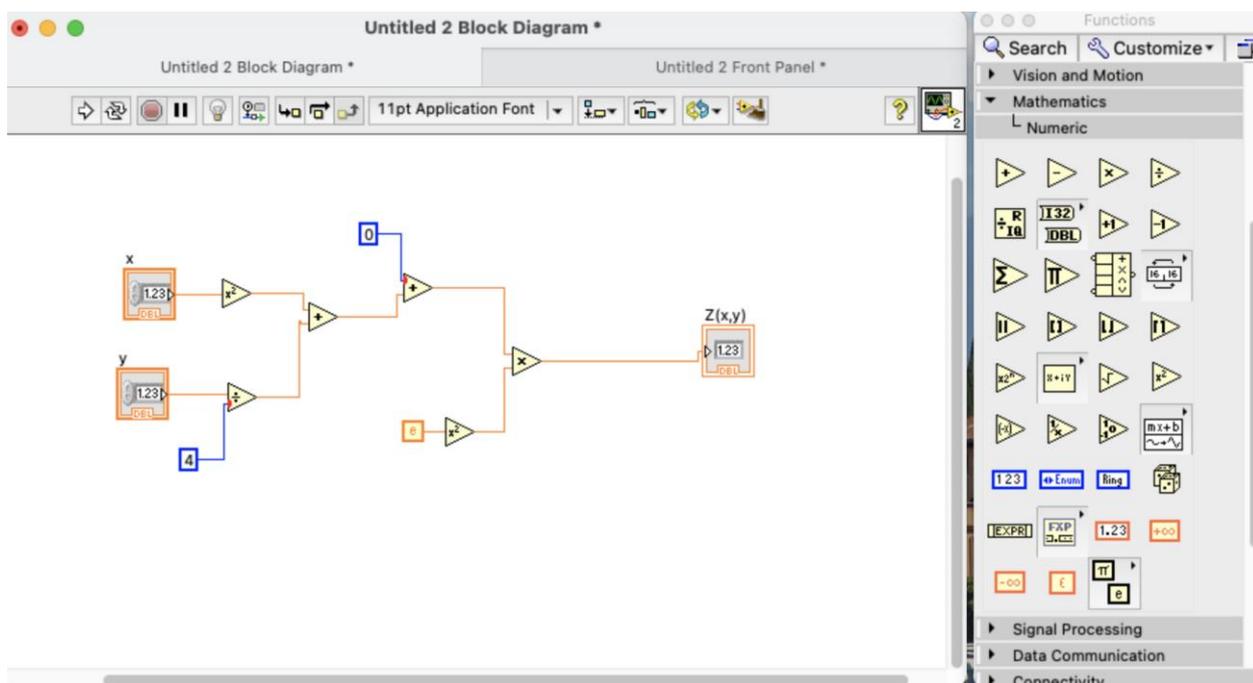
Use the Expression Node to calculate expressions that contain a single variable. The following built-in functions are allowed in formulas: abs, acos, acosh, asin, asinh, atan, atanh, ceil, cos, cosh, cot, csc, exp, expm1, floor, getexp, getman, int, intrz, ln, lnp1, log, log2, max, min, mod, rand, rem, sec, sign, sin, sinc, sinh, sizeofDim, sqrt, tan, tanh.

Right-click the node and select **Build Unit String** from the shortcut menu to build and edit a string of units.

#### [Detailed help](#)

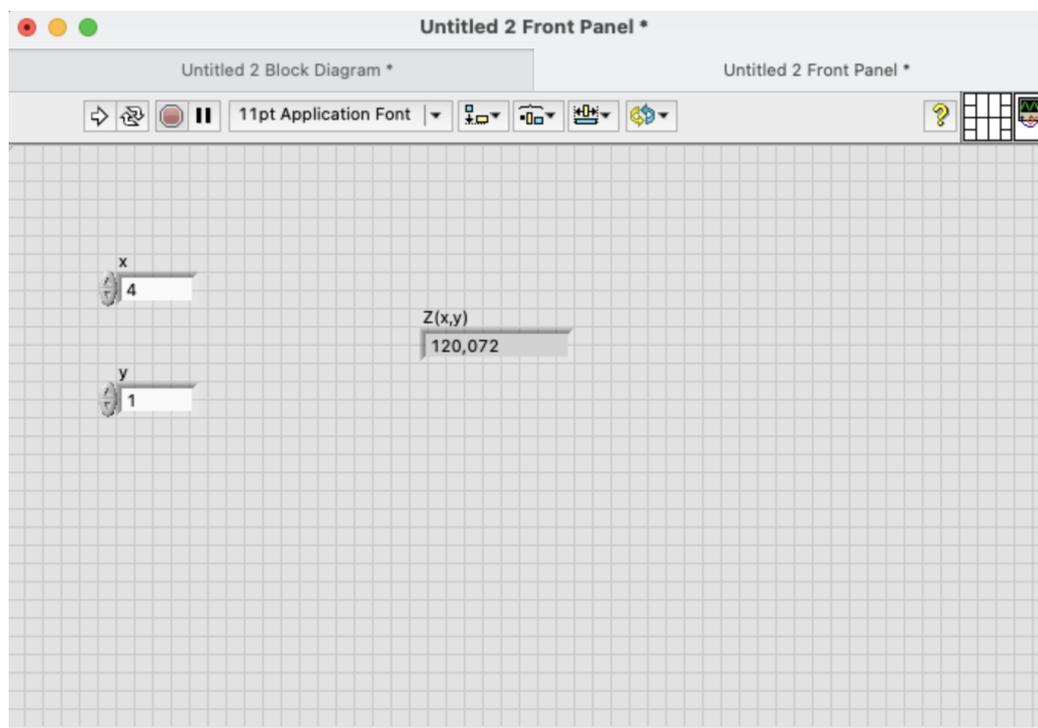
Для использования блока вынесите его на поле блока диаграммы и кликните по нему элементом панели соединений **Operate Value** 

**Шаг 5.** Используя монтажный инструмент **Connect Wire** (катушка) выполните соединение согласно заданному уравнению.



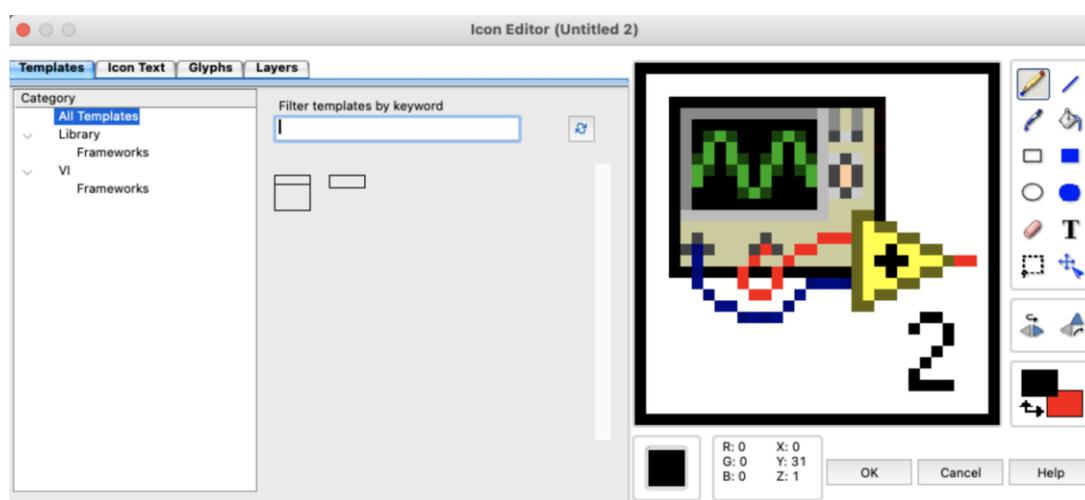
**Примечание:** следует обратить внимание на то, что в данной схеме арифметические операции применяются к различным форматам данных, но компиляции и выполнению программы в среде LabVIEW это не мешает.

**Шаг 6.** Переключитесь на лицевую панель, введите данные в поля  $x$  и  $y$  и нажмите на кнопку **Run** . В окне индикатора  $Z(x,y)$  отобразится численное значение функции.



## 2.1 Создание иконки виртуального прибора и формирование соединительной панели

Иконка является графическим индикатором ВП и отображается в правом верхнем углу лицевой панели или блок схемы. Иконка формируется автоматически и может содержать графическую и текстовую информацию. Основное назначение иконки ВП – это возможность встраивания ВП в более сложную блок схему ВП в качестве подприбора (эквивалент подпрограммы). Для наглядности и уменьшения размера блок-схемы желательно создавать собственные иконки, используя **Редактор иконки (Icon Editor)**. Для его вызова нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по иконке и выбрать меню **Редактирование иконки (Edit Icon)**.

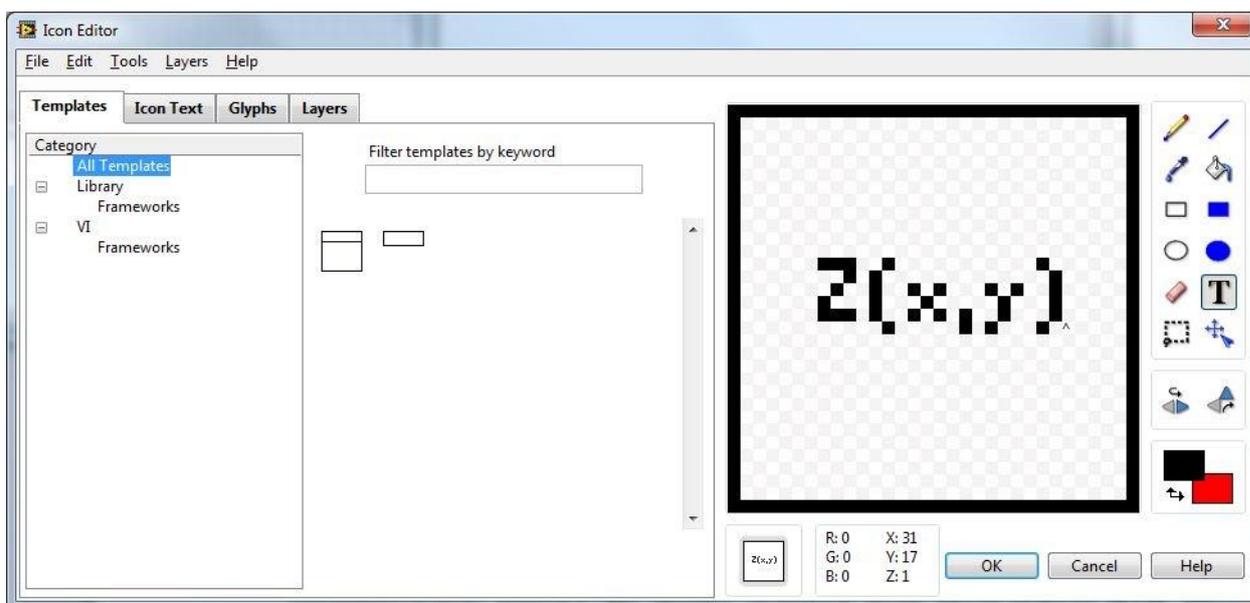


Создадим иконку для созданного прибора, вычисляющего значение функции  $Z(x,y)$

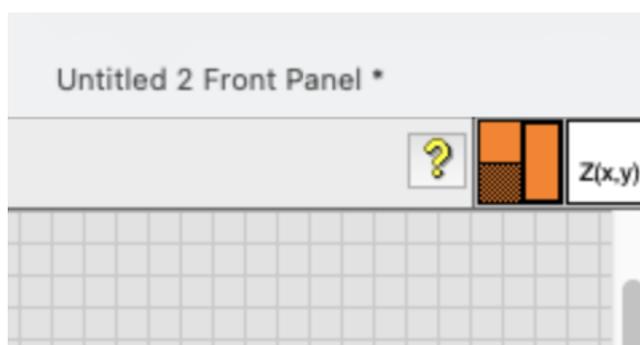
**Шаг 1.** В появившемся окне в главном меню выберите **Edit**⇒**Clear All**.

**Шаг 2.** При помощи инструмента *Прямоугольник* **Rectangle** создайте рамку по периметру иконки.

**Шаг 3.** Инструментом *Ввод текста* **Text** напечатайте название виртуального прибора – **Z(x,y)**. Нажмите **ОК**.

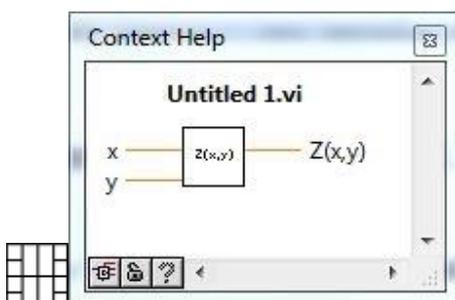


**Шаг 4.** Сформируем соединительную панель ВП. На лицевой панели слева от иконки находится соединительная панель.



Щелкните левой кнопкой мыши на левом верхнем поле соединительной панели иконки. Выбранное поле окрасится в черный цвет. Подведите курсор на элемент  $x$  и щелкните левой кнопкой мыши. Поле ввода окрасится в оранжевый цвет. Отведите курсор на свободное место и щелкните мышью. Повторите аналогичную операцию для входного поля  $y$  и выходного поля

$Z(x,y)$ . Теперь при наведении курсора на иконку в окне **Help Context** будет отображаться следующее:



Сохраните ВП под именем **function** с помощью главного меню **File**⇒**Save As**.

### 3. Задание

Создайте виртуальный прибор, который вычисляет значение функции  $Z(x,y)$ . Создайте для него иконку, соединительную панель и сохраните в папке своей группы.

Вариант	Функция $Z(x,y)$	Вариант	Функция $Z(x,y)$
1	$\ln(x+4) - y^2 + 3$	11	$4^x + \operatorname{tg}(xy) - 2x$
2	$\sin(x) + \cos(y) / 4 + 3x$	12	$e^{y/2} - \ln(3x) + 5y$
3	$\log_2(x+3) + y/2$	13	$\sin(2xy)^2 - \log_2 x + \cos(y/4)$
4	$e^x + \operatorname{tg}(y+1) - x/4$	14	$x^3 + y^3 - 2\ln(xy)$
5	$\cos(x)^2 + \ln(5y) + y^2$	15	$ye^{2x} - 3x^2 + 2y$
6	$\sin(x+y) + y^3 - 0.5x$	16	$0.36x^2 + \sin(2y^3)$
7	$x^3 + y^2 + 2x - 4$	17	$\cos(x-2)^2 + \ln(0.83y) + 1$
8	$e^4 - \log_2(xy) + 3x - y$	18	$xe^y + \cos(x+3) + 3e$
9	$xe^y + \sin(x^2) - y$	19	$2x/e + \operatorname{tg}(y^3) - 2$
10	$(3x+2y)^2 - \ln(y^2)$	20	$\cos(2x) - 4y + xy$

#### Лабораторная работа №2

### Изучение состава и принципа использования стенда «Квадрокоптер» и изучение интерфейса пакета LabView.

*Цель работы:* изучить аппаратную и программную основу макета квадрокоптера, познакомиться со средой разработки LabVIEW, научиться пользоваться виртуальными приборами, LabVIEW.

*Теоретические сведения:*

#### Общие сведения

Данный программно-аппаратный комплекс предназначен для работы с макетом квадрокоптера и построения систем управления им.

Макет состоит из четырёх винтов, установленных на фиксированном основании. В составе установки имеется четыре электродвигателя постоянного тока. Передний и задний электродвигатели предназначены для задания тангажа, правый и левый электродвигатели предназначены для задания крена. Винты макета квадрокоптера закреплены на жёстком основании. У основания имеется три степени свободы, что обеспечивает ему возможность поворачиваться относительно продольной, поперечной и

вертикальной оси. Каждый винт создаёт тягу, равнодействующая этих сил тяги, обеспечивает задание тангажа и крена макета. Пары винтов в макете имеют различное направление вращения, таким образом, при одинаковой тяге винтов, макет находится в сбалансированном состоянии. Углы поворота относительно каждой из осей измеряются с помощью высокоточных энкодеров. Сигналы передаются через токосъёмное кольцо, что обеспечивает вращение относительно вертикальной оси на 360 градусов. На рисунке 1 представлен общий вид установки.



Рис. 1

### **Компоненты установки**

Платформа с финтами состоит из следующих компонентов:

Корпусов винтов (1).

Электродвигателей (2, 3).

Энкодеров для измерения углов крена, тангажа и рыскания (4,5)

Траверсы (6).

Платы управления двигателями и энкодерами (7).

Основания (8).

Токосъёмного кольца (9).

Винтов (10).

Все компоненты платформы для наглядности представлены на рисунке 2 и обозначены соответствующими номерами.

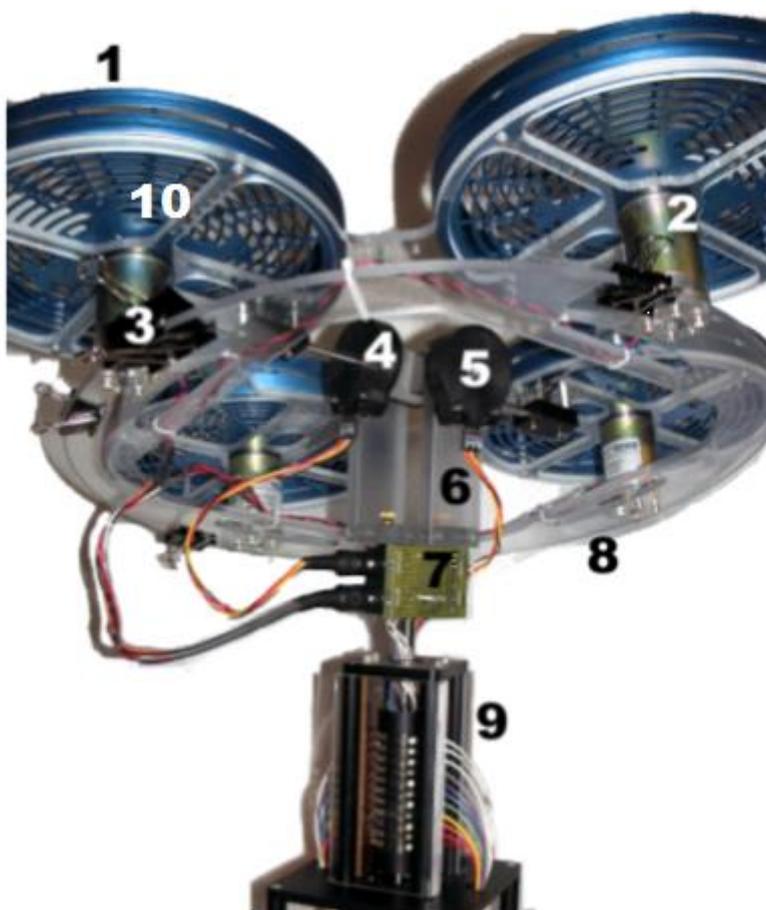


Рис. 2

Основание лабораторной установки состоит из :

Станины (11).

Соединителей для подключения двигателей к управляющему компьютеру (12, 13, 14, 19).

Соединителей для подключения к управляющему компьютеру энкодеров углов (15, 16, 17).

Оси (18).

Компоненты основания представлены на рисунке 3

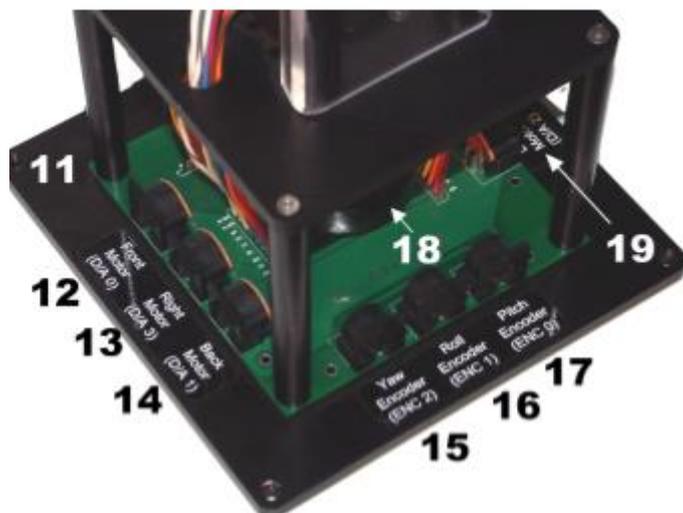


Рис. 3

### Программное обеспечение

Для управления стендом используется среда разработки LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench - среда разработки лабораторных виртуальных приборов) является средой программирования, с помощью которой можно создавать приложения, используя графическое представление всех элементов алгоритма.

В LabVIEW используется терминология, рисунки иконок и основные идеи, знакомые ученым и инженерам. Этот язык базируется на графических символах, а не на тексте для описания программируемых действий. Основопологающий для LabVIEW принцип потока данных, согласно которому функции выполняются лишь тогда, когда они получают на вход необходимые данные, однозначно определяет порядок исполнения алгоритма.

Программы LabVIEW называются виртуальными приборами (ВП), так как они функционально и внешне подобны реальным приборам.

Виртуальный прибор состоит из двух основных частей:

– лицевая панель (Front Panel) представляет собой интерактивный пользовательский интерфейс виртуального прибора и названа так потому, что имитирует лицевую панель традиционного прибора. На ней могут находиться ручки управления, кнопки, графические индикаторы и другие элементы управления.

– блок-диаграмма (Block Diagram) является исходным программным кодом ВП, созданным на языке графического программирования LabVIEW. Блок-диаграмма представляет собой реально исполняемое приложение. Компонентами блок-диаграммы являются: виртуальные приборы более низкого уровня, встроенные функции LabVIEW, константы и структуры управления выполнением программы и тд.

### Лабораторная работа № 3

#### Формирование абстрактной модели динамики стенда.

Цель и задачи работы: определение формирования модели динамики квадрокоптера и стенда на основе фундаментальных положений теоретической механики.

#### Краткие теоретические сведения.

Математическая модель изменения каждого из углов, характеризующих пространственное положение макета, описывается следующим выражением:

$$J \cdot \ddot{\theta} = \Delta F \cdot L$$

здесь:  $\theta$  – угол поворота относительно соответствующей оси,  $L$  – расстояние между осью винта и центром инерции,  $J$  – момент инерции относительно соответствующей оси,  $\Delta F$  – изменение силы тяги.

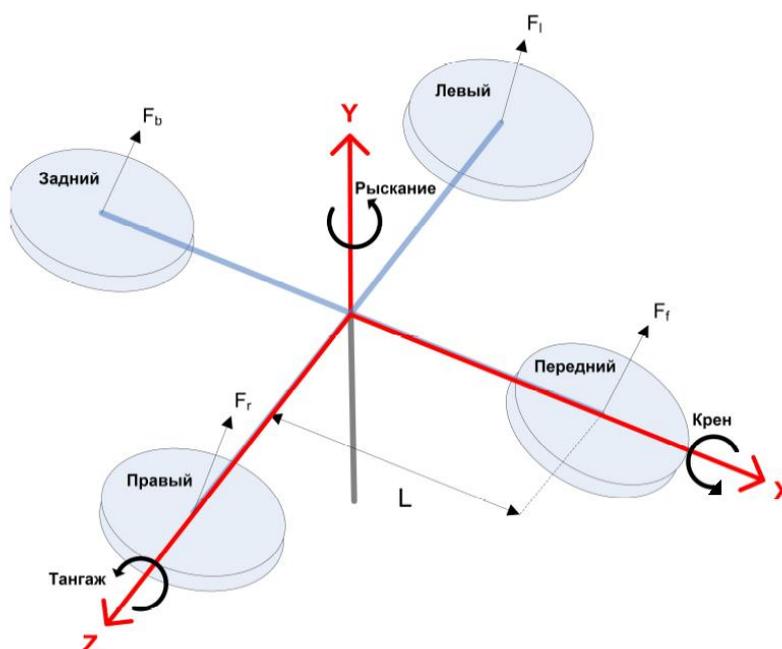


Рисунок 1. Диаграмма приложения сил к макету квадрокоптера

В соответствии с рисунком 1 закон изменения тангажа может быть записан в следующем виде:

$$J_z \cdot \ddot{\theta} = K_f \cdot (V_f - V_b) \cdot L \quad (1)$$

здесь:  $K_f$  – постоянная тяги,  $V_f$  – напряжение питания переднего электродвигателя,  $V_b$  – напряжение питания заднего электродвигателя,  $J_z$  – момент инерции относительно поперечной оси.

В данном выражении учитывается, что угол тангажа положителен, когда передний электродвигатель создаёт силу тяги большее, чем задний электродвигатель.

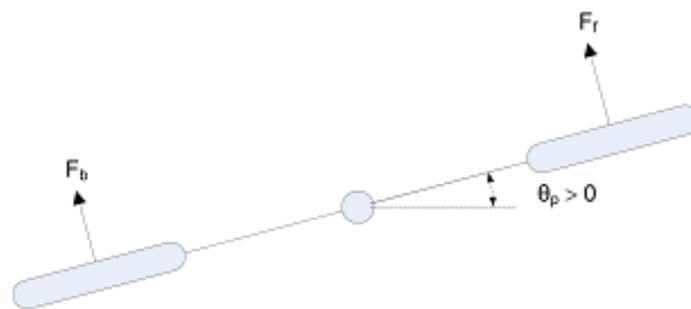


Рисунок 2. Диаграмма приложения сил для поперечной оси.

Закон изменения крена может быть записан в следующем виде:

$$J_x \cdot \ddot{\psi} = K_f \cdot (V_r - V_l) \cdot L \quad (2)$$

здесь:  $K_f$  – постоянная тяги,  $V_r$  – напряжение питания правого электродвигателя,  $V_l$  – напряжение питания левого электродвигателя,  $J_x$  – момент инерции относительно продольной оси. В данном выражении, учитывается, что крен положителен, когда правый электродвигатель создаёт силу тяги больше, чем левый электродвигатель.

Вращение относительно вертикальной оси (см. рисунок 3), является следствием разницы моментов, создаваемых винтами, вращающимися по часовой стрелке и против часовой стрелки.

$$J_y \cdot \ddot{\psi} = M_l + M_r - M_f - M_b$$

Моменты, создаваемые винтами, вращающимися против часовой стрелки определены как отрицательные. Величина момента, создаваемая любым из винтов, может быть определена как  $M = K_t \cdot V_m$ ,  $K_t$  – постоянная тяги,  $V_m$  – напряжение питания электродвигателя. Таким образом, выражение можно записать следующим образом:

$$J_y \cdot \ddot{\psi} = K_t \cdot (V_r + V_l) - K_t \cdot (V_f + V_b) \quad (3)$$

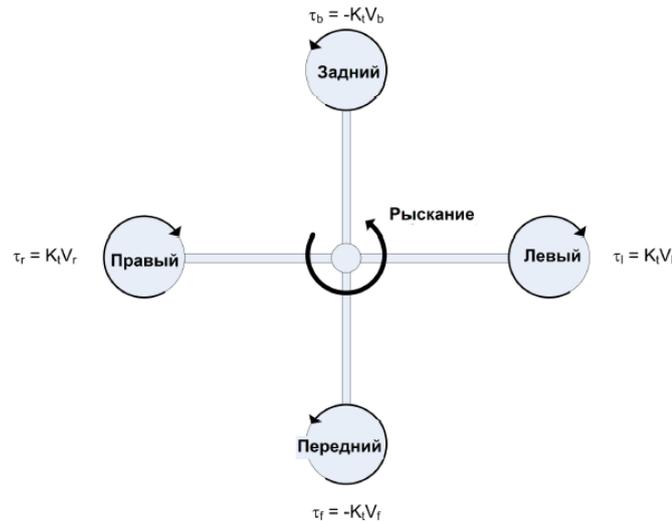


Рисунок 2. Диаграмма приложения сил для вертикальной оси  $y$ .

Описание модели в пространстве состояний имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du,$$

здесь  $x$ ,  $y$  и  $u$  – вектора состояния, выхода и входа, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – матрицы соответствующих размерностей.

Вектор состояния системы:

$$x^T = \left[ \psi \ \vartheta \ \gamma \ \frac{d\psi}{dt} \ \frac{d\vartheta}{dt} \ \frac{d\gamma}{dt} \right],$$

Вектор выходных управляемых величин:

$$y^T = [\psi \ \vartheta \ \gamma],$$

Вектор управления (входа):

$$u^T = [V_f \ V_b \ V_r \ V_l]$$

Используя векторы состояния, выхода и входа, а так же выражения (1)–(3) определим вид матрицы системы  $A$ , матрицы управления  $B$ , матрицы наблюдения  $C$ , матрицы связи  $D$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_t}{J_y} & \frac{-K_t}{J_y} & \frac{K_t}{J_y} & \frac{K_t}{J_y} \\ \frac{L \cdot K_f}{J_z} & \frac{-L \cdot K_f}{J_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L \cdot K_f}{J_x} & \frac{-L \cdot K_f}{J_x} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее рассмотрим вычисление коэффициентов матрицы, описывающей математическую модель регулятора, с помощью линейно-квадратического алгоритма (LQR), или, как его ещё называют, метода АКОР (аналитического конструирования оптимальных регуляторов).

Управляющее воздействие на двигатели описывается следующим выражением:

$$u^T = [V_f \ V_b \ V_r \ V_l] = \begin{cases} K \cdot (x_d - x) + u_{см} & \text{если } u \geq 0 \\ 0 & \text{если } u < 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $x$  – состояние системы в данный момент времени;  $K$  – матрица обратных связей, описывающая регулятор;  $x_d = [\psi \ \vartheta \ \gamma \ 0 \ 0 \ 0]$  – вектор, характеризующий желаемое пространственное положения квадрокоптера;  $u_{см}^T = [V_{см} \ V_{см} \ V_{см} \ V_{см}]$  – характеризует постоянное напряжение смещения, имитирующее компенсацию силы тяжести, действующей на объект управления.

Из (4) следует, что закон управления по обратной связи будет иметь вид:

$$u = K \cdot (x_d - x) + u_{см},$$

Регулятор представляет собой матрицу обратных связей  $K$ . Этот вектор находится таким образом, чтобы возникающие в этой системе процессы минимизировали квадратичный функционал качества:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt ,$$

где  $Q$  и  $R$  – неотрицательно определённые матрицы соответствующей размерности (весовые матрицы). Матрица  $Q$  должна быть Эрмитовой (симметричной) и положительно полуопределённой. Такими свойствами обладает единичная матрица или любая диагональная матрица с неотрицательными элементами. Весовые матрицы будут иметь следующий вид:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 \end{bmatrix}$$

Матрица  $N$  чаще всего выбирается нулевой. Известно, что оптимальный регулятор для линейной полностью управляемой системы всегда существует и может быть найден с помощью решения матричного уравнения Риккати:

$$S \cdot A + A^T \cdot S - (S \cdot B + N) \cdot R^{-1} \cdot (B^T S + N) + Q = 0$$

В MatLab расчёт оптимального регулятора осуществляет функция `lqr`, которой надо передать ЛСС в форме пространства состояний и матрицы  $Q$ ,  $R$  и  $N$ , определяющие критерий качества. Эта функция возвращает кроме вектора обратных связей  $K$ , ещё решение уравнения Риккати  $S$  и вектор характеристических чисел замкнутой системы  $E$ . Рассмотрим пример подобного синтеза:

### Пример

Задаём матрицы пространства состояний и преобразуем их в ss-форму.

```
A =
    -10    -3.125     0
     32     0     0
     0     16     0

B =
     1
     0
     0

C =
     0     0    0.9765625

D =
     0

>>Wss=ss(A, B, C, D);
```

Зададим матрицы для вычисления функционала качества:

```
>> Q=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]
```

>> R=2

Выполняем вычисление оптимального регулятора:

>> [K S E]=lqr(Wss,Q,R)

Теперь надо собрать замкнутую систему, которая будет описываться уравнениями:

$$\dot{x} = (A - BK)x$$

$$y = (C - DK)x,$$

или в MatLab:

>> Wssz=ss(A-B\*K, B, C-D\*K, D)

Теперь можно посмотреть, например, переходную характеристику замкнутой системы:

>>step(Wssz)

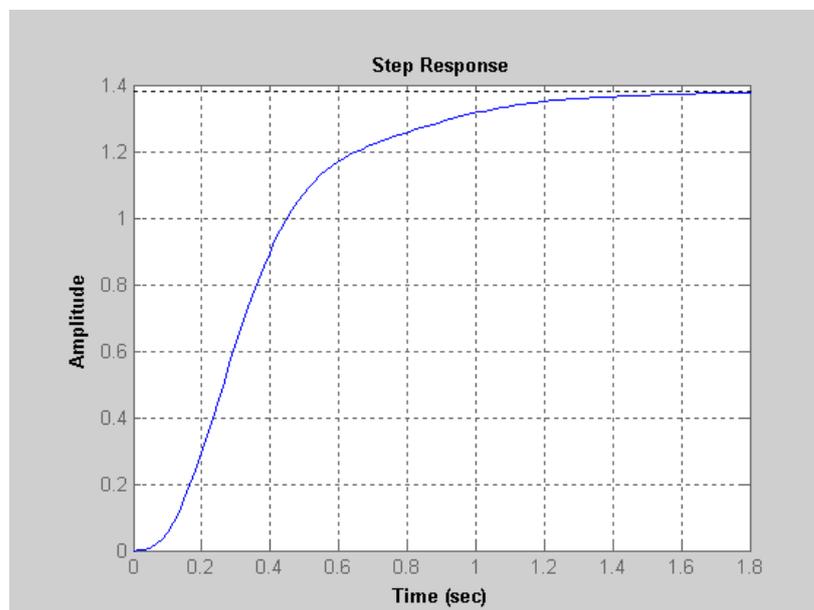


Рисунок 3. График переходного процесса

### Порядок выполнения лабораторной работы

1) С помощью системы MatLab получить методом АКОР оптимальный регулятор для стенда квадрокоптера используя матрицы, приведённые в теоретических сведениях (исходные данные для матриц A, B, C, D приведены ниже в таблице 1). При этом выбрать такие весовые матрицы Q и R, чтобы переходные характеристики системы с рассчитанным регулятором удовлетворяли условию: перерегулирование  $\sigma \leq 15^\circ$ , время регулирования  $\tau_{\text{пер}} \leq 2$  с.

Таблица 1. Основные характеристики макета квадрокоптера

Обозначение	Наименование	Значение	Единица измерения
$K_t$	Константа крутящего момента	0,0036	Н·м/В
$K_f$	Константа осевой нагрузки	0,1188	Н/В
$L$	Расстояние между центром инерции и осью ротора каждого двигателя	0,197	м
$J_y$	Эквивалентный момент инерции относительно вертикальной оси	0,110	кг·м <sup>2</sup>
$J_z$	Эквивалентный момент инерции относительно поперечной оси	0,0552	кг·м <sup>2</sup>
$J_x$	Эквивалентный момент инерции относительно продольной оси	0,0552	кг·м <sup>2</sup>

2) Используя программу LabVIEW выполнить синтез и виртуальное моделирование работы регулятора, используемого для контроля пространственного положения макета квадрокоптера. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Запустить программное обеспечение LabVIEW.
2. Открыть виртуальный прибор *3 DOF Hover Modeling.vi*, ввести параметры стенда, промоделировать, и сохранить полученные матрицы системы, управления, наблюдения, связи.
3. Открыть виртуальный прибор *3 DOF Hover Control Design*, запустить его на исполнение, нажав кнопку *Run*. В появившемся окне загрузить модель из папки *Hover Model*, сгенерированную при помощи виртуального прибора *3 DOF Hover Modeling.vi*. После загрузки вкладка *Load Model* должна выглядеть так, как это показано на рисунке 4.

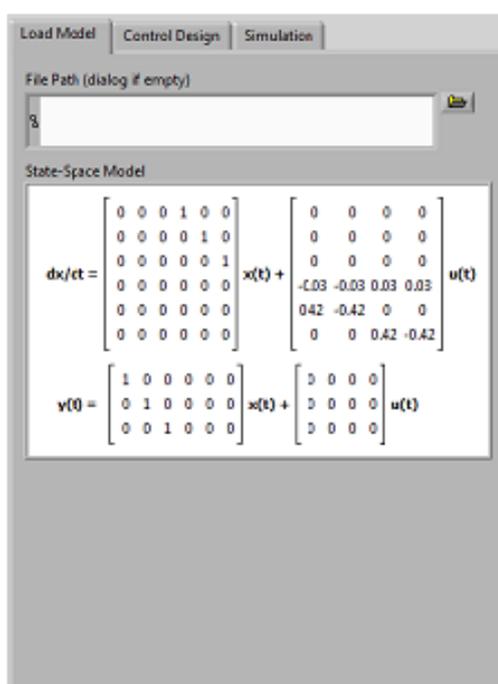


Рисунок 4. Вкладка Load Model

4. Открыть вкладку *Control Design* для синтеза регулятора (рисунок 5). Откорректировать элементы матриц Q и R в соответствии с первой частью лабораторной работы. Сравнить матрицу коэффициентов обратных связей с полученной ранее.

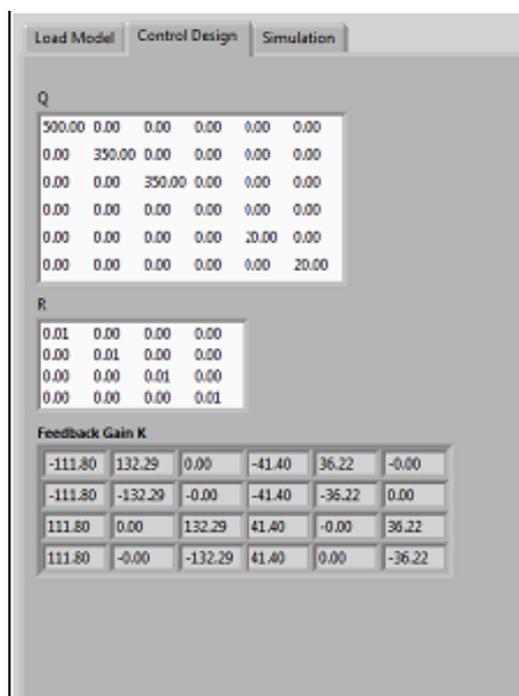


Рисунок 5. Вкладка Control Design

5. Открыть вкладку *Simulation* и задать параметры изменения углов.

6. Нажатием кнопки ОК запустить моделирование. На графиках должна отобразиться отработка моделью макета квадрокоптера заданных значений рысканий, крена и тангажа. График сигналов управления каждым из электродвигателей может быть просмотрен на вкладке *Motor Voltage*.

Выполнить моделирование для каждого угла в отдельности. Например, задать изменение рыскания в пределах  $\pm 5^\circ$  с частотой 0,04 Гц, затем изменение тангажа в пределах  $\pm 2^\circ$  с частотой 0,08 Гц и изменение крена в пределах  $\pm 2^\circ$  с частотой 0,08 Гц.

Провести моделирование совместно для всех углов и сохранить полученные результаты.

Провести анализ отработки углов при полученных параметрах регулятора.

- 3) Проверить функционирование ранее синтезированного линейно-квадратического регулятора с помощью натурального моделирования макета квадрокоптера. Для этого следует:
1. Запустить файл-проект *3 DOF Hover*.
  2. Найти в открывшемся проекте файл *3 DOF Hover Control (cRIO)* и запустить его.
  3. В поле *Feedback Gain K* ввести коэффициенты матрицы *K*, полученной в предыдущих пунктах лабораторной работы.
  4. Запустить виртуальный прибор на исполнение. На графиках должна отобразиться отработка макетом квадрокоптера заданных значений рысканий, крена и тангажа.
  5. Если заданные к макету квадрокоптера требования не удовлетворяются, то следует перейти к работе с файлом *3 DOF Hover Control Design.vi*, изменить в нём коэффициенты весовых матриц и синтезировать новый регулятор или воспользоваться для этой цели системой MatLab.

Удостовериться, что при использовании синтезированного регулятора пространственное положение макета квадрокоптера изменяется аналогично результатам, полученным при выполнении виртуального моделирования.

Сделать выводы о качественных характеристиках модели при полученном регуляторе.

### **Контрольные вопросы**

1. Каким образом составлены матрицы *A*, *B*, *C*, *D*?

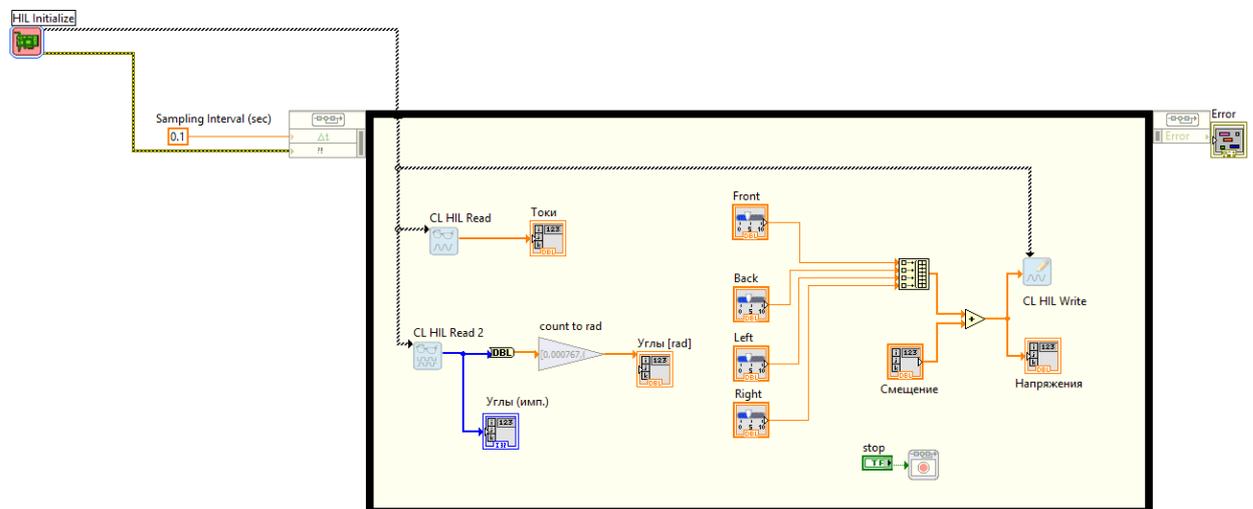
2. Как изменение параметров матриц  $Q$  и  $R$  влияют на работу регулятора?
3. Назовите плюсы и минусы управления с помощью обратных связей.

#### Лабораторная работа №4

### Идентификация параметров модели стенда. Экспериментальное определение тяговой и моментной характеристики винтомоторной пары.

Для выполнения лабораторной работы нам понадобится виртуальный прибор, позволяющий регулировать напряжение на обмотке двигателей, измерять углы крена, тангажа и рыскания, ток в обмотке двигателя, а также задавать смещение напряжения.

Блок-диаграмма ВП представляет собой набор модулей, соединенных виртуальными проводами. Обработка и выполнение модулей осуществляется слева направо. Открыть окно диаграммы можно с помощью сочетания клавиш **Ctrl+E**. Общий вид блок-диаграммы:



В первую очередь программа выполняет блок **HIL Initialize**, осуществляющий инициализацию аппаратной части.

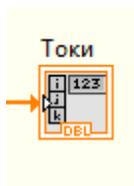
Блок **Sampling interval** осуществляет прерывание цикла опроса датчиков, снижая частоту опроса до 10 Гц.

Часть диаграммы, находящаяся в черной рамке, представляет собой цикл опроса датчиков угла и тока и вывода на панель значения напряжения.

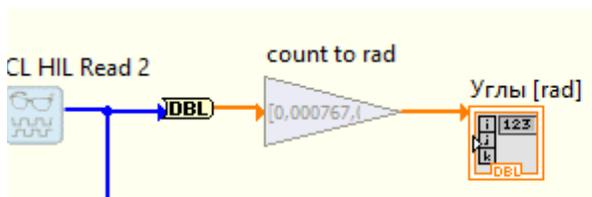
Блоки CL HIL Read и CL HIL Read 2 осуществляют опрос датчиков тока обмоток двигателей и углов соответственно.



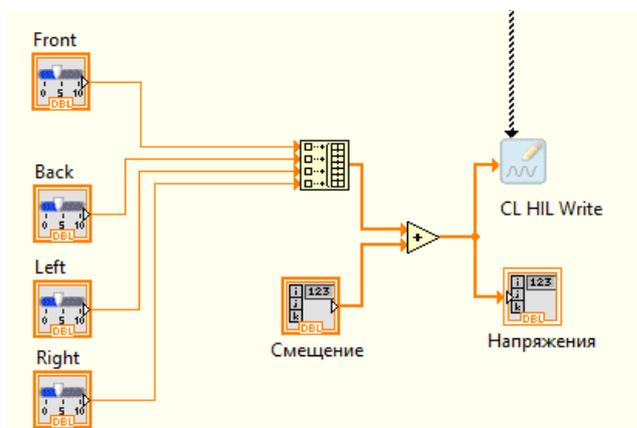
Значения токов инициализируются как массив и выводятся на панель блоком Токи.



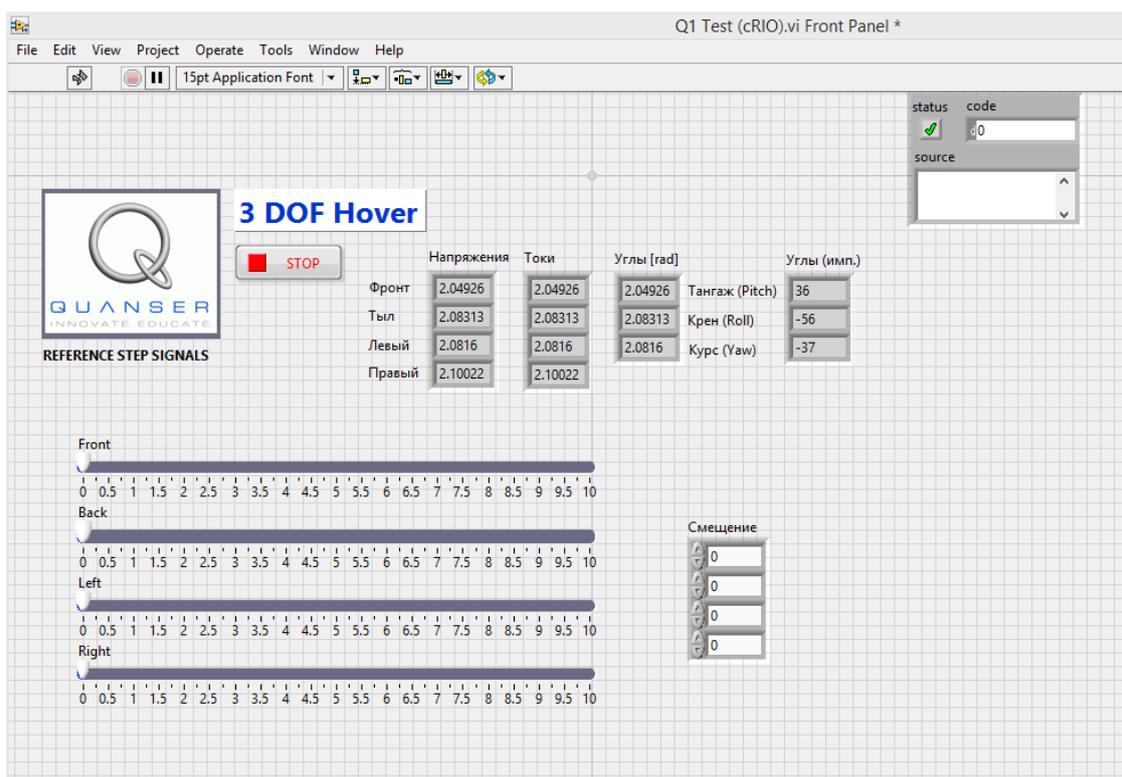
Значения углов в блоке count to rad сначала умножаются на константу, переводящую данные с датчиков углов в радианы, затем инициализируются как массив и выводятся на панель блоком Углы[rad].



Значения дополнительных напряжений на двигателях объединяются в массив и суммируются со значениями массива Смещение. Блок Напряжение выводит на панель заданную сумму. Блок CL HIL Write отдает значения полного напряжения аппаратной части.



Ниже представлен общий вид лицевой панели виртуального прибора:



Программа и стенд запускаются при нажатии иконки с изображением стрелки на верхней панели.

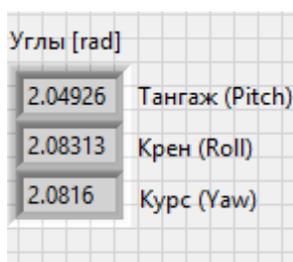
Остановить программу и стенд можно с помощью кнопки STOP на лицевой панели ВП.



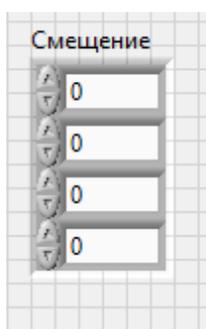
В окнах Напряжение и Токи отображаются реальные, измеряемые в данный момент времени, значения напряжения и тока в обмотках двигателей макета

	Напряжения	Токи
Фронт	2.04926	2.04926
Тыл	2.08313	2.08313
Левый	2.0816	2.0816
Правый	2.10022	2.10022

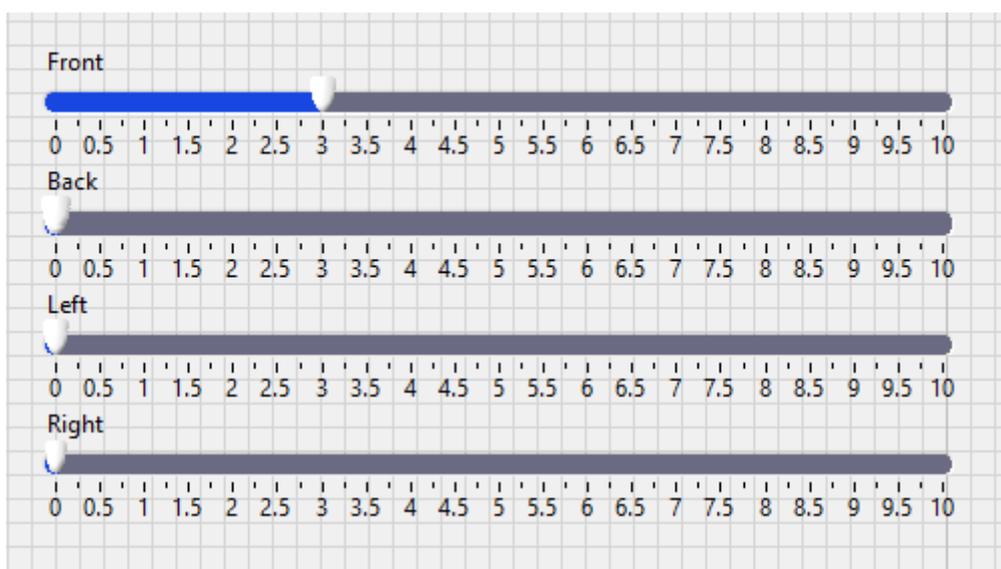
В окне Углы отображаются значения в радианах углов тангажа, крена и рыскания измеряемые в данный момент времени .



В окне Смещение задаются начальные значения напряжения в обмотках каждого двигателя в вольтах. При задании смещения с помощью боковых регуляторов, можно задать напряжение только в целых числах. В случае необходимости задания дробных значений смещения, напряжение меняется непосредственно в окне отображения смещения.



Четыре линейных регулятора используются для задания дополнительного напряжения на двигателях. Для задания необходимого напряжения нужно мышкой перевести указатель регулятора по шкале до необходимого значения.



С помощью шкалы Front, Back, Left и Right изменяются напряжения на переднем, заднем, левом и правом двигателе соответственно. На рисунке выше на передний двигатель подается дополнительное напряжение 3 В.

Полное напряжение на двигателе определяется как сумма напряжения смещения и дополнительного напряжения.

### *Порядок выполнения работы*

1. Ознакомиться с макетом квадрокоптера.
2. Открыть соответствующей данной лабораторной работе виртуальный прибор и ознакомиться с его структурой.
3. В окнах смещения и дополнительного напряжения на лицевой панели задать нулевые значения по всем 4 двигателям. Убедиться в том, что винты не вращаются, а макет параллелен полу с помощью окна отображения углов.
4. Прикрепить к переднему винту макета груз.
5. Изменяя дополнительное напряжение на переднем двигателе, добиться выравнивания макета. Определить по шкале, при каком напряжении произошло выравнивание, и задать аналогичное напряжение в окне смещения для всех четырех двигателей, не передвигая указатели дополнительного напряжения. Записать значение полного напряжения (для первого измерения полное напряжение равно дополнительному)
6. Снова отрегулировать угол наклона макета с помощью изменения дополнительного напряжения на переднем двигателе и записать значение полного напряжения (смещение + доп. напряжение)
7. Прodelать эксперимент, описанный в пунктах 5-6, четыре раза с различными грузами.
8. Построить график зависимости тяги винта от подаваемого на двигатель напряжения, сделать вывод о линейности этой зависимости и рассчитать коэффициент тяги, то есть отношение силы тяги к подаваемому напряжению.

### *Лабораторная работа №5*

#### **Экспериментальное определение тензора инерции стенда.**

*Цель работы:* определить экспериментально численное значение тензора инерции стенда.

#### *Теоретические сведения*

Лабораторный стенд представляет собой жестко закрепленный макет квадрокоптера, приведенный на рис. 1, который имеет 3 степени свободы. Макет управляется специальной ЭВМ реального времени, связанной с универсальной ЭВМ. При помощи установленных на последней программных средств системы LabVIEW создается модель системы управления. Реализующий эту модель алгоритм загружается в ЭВМ реального времени. Управляющий компьютер реального времени эмулирует работу данной модели, вырабатывая команды управления стендом. Результаты работы системы поступают на универсальный компьютер, где могут быть представлены в графическом, числовом и других видах.



Рис. 1. Макет квадрокоптера

В документации, прилагаемой к лабораторной установке, [2] приведены значения некоторых параметров и характеристик данного стенда, в том числе и момент инерции относительно поперечной оси в горизонтальной плоскости (рис. 2). Эти значения могут быть использованы в дальнейшем в качестве контрольных, позволяющих оценить успешность эксперимента и его обработки.

$J_p$	Эквивалентный момент инерции относительно поперечной оси	0,0552	кг·м <sup>2</sup>
$J_r$	Эквивалентный момент инерции относительно продольной оси	0,0552	кг·м <sup>2</sup>

Рис.2. Характеристики макета квадрокоптера, приведенные в руководстве по эксплуатации

В связи с тем, что макет квадрокоптера имеет продольную и поперечную симметрию, можно считать, что моменты инерции относительно этих осей равны. Поэтому достаточно определить только один из них. Будем определять момент инерции относительно поперечной оси  $OZ$ .

Изменение угла тангажа описывается в соответствии со вторым законом Ньютона для вращательного движения равенством

$$M(u) = J\varepsilon(u), \quad (1)$$

где:  $M(u)$  - момент сил, развиваемый винтами, зависящий от напряжения;  $J$  - момент инерции,  $\varepsilon$  - угловое ускорение относительно оси вращения.

Суммарный момент сил равен сумме моментов силы тяги винта, вязкого трения и возвращающего момента, вызванного смещением центра масс макета относительно оси вращения квадрокоптера. Возвращающий момент пропорционален синусу угла отклонения по тангажу, но при малых значениях угла можно считать, что он будет пропорционален самому углу.

$$M(u) = l \cdot F(u) - \beta \cdot \dot{\theta} - a \cdot \theta, \quad (2)$$

где:  $F(u)$  - сила тяги;  $l$  - расстояние от оси вращения аппарата до оси вращения двигателя (плечо силы);  $\beta$  - коэффициент момента вязкого трения;  $\alpha$  - коэффициент возвращающего момента;  $\theta$  - угол тангажа.

Если в течение некоторого промежутка времени не изменять значение напряжения, то и момент силы останется постоянной величиной. Исходя из этого, получаем дифференциальное уравнение, которое описывает изменение угла тангажа по времени,

$$\varepsilon(t) = \ddot{\theta} = \frac{lF(u_{const}) - \beta\dot{\theta} - a\theta}{J}. \quad (3)$$

Для того чтобы решить выражение (3), приведем его к виду

$$\ddot{\theta} + \frac{\beta}{J}\dot{\theta} + \frac{a}{J}\theta = \frac{M_T}{J}, \quad (4)$$

после чего применим к уравнению (4) прямое преобразование Лапласа и перейдем к изображениям:

$$p^2\Theta(p) - p\theta(0) - \theta'(0) + \frac{\beta}{J}p\Theta(p) - \frac{\beta}{J}\theta(0) + \frac{\alpha}{J}\Theta(p) = \frac{M_T}{J \cdot p}, \quad (5)$$

где:  $\theta(0)$  и  $\theta'(0)$  - начальные условия.

В качестве начальных условий примем точку максимального отклонения угла тангажа в связи с тем, что производная в этой точке, а именно угловая скорость, равна нулю.

$$\theta(0) = \theta_{\max}, \quad \theta'(0) = 0. \quad (6)$$

Упростим выражение (5) с учетом начальных условий (6).

$$\Theta(p) = \frac{\frac{M_T}{J}}{p(p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J})} + \frac{p\theta_{\max} + \frac{\beta}{J}\theta_{\max}}{p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J}}. \quad (7)$$

При отклонении макет квадрокоптера имеет затухающие колебания, что говорит о наличии комплексно сопряженных корней. Разложим общую часть знаменателей двух дробей на множители и упростим.

$$p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J} = 0, \quad p_{1,2} = \frac{-\frac{\beta}{J} \pm \sqrt{\frac{\beta^2}{J^2} - 4\frac{\alpha}{J}}}{2} = -\frac{\beta}{2J} \pm j \frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}.$$

$$\begin{aligned}
p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J} &= \left(p + \frac{\beta}{2J} - j\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)\left(p + \frac{\beta}{2J} + j\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right) = \\
&= \left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 - \left(j\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2 = \left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2.
\end{aligned} \tag{8}$$

Таким образом, выражение (7) примет вид

$$\Theta(p) = \frac{\frac{M_T}{J}}{p\left(\left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2\right)} + \frac{p\theta_{\max} + \frac{\beta}{J}\theta_{\max}}{\left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2}. \tag{9}$$

Обратное преобразование Лапласа будем рассматривать для каждой дроби отдельно.

Разложим первую дробь на сумму дробей

$$\begin{aligned}
&\frac{\frac{M_T}{J}}{p\left(\left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2\right)} = \frac{A}{p} + \frac{Bp + C}{p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J}}, \\
&A\left(p^2 + \frac{\beta}{J}p + \frac{\alpha}{J}\right) + p(Bp + C) = \frac{M_T}{J}, \\
&p^2 \begin{cases} A + B = 0 \\ \frac{\beta}{J}A + C = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} B &= -\frac{M_T}{\alpha} \\ C &= -\frac{M_T\beta}{\alpha J} \end{aligned} \\
&p^0 \begin{cases} \frac{\alpha}{J}A = \frac{M_T}{J} \\ A = \frac{M_T}{\alpha} \end{cases} \\
&\frac{\frac{M_T}{\alpha}}{p} - \frac{\frac{M_T}{\alpha}p + \frac{M_T\beta}{\alpha J}}{\left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2}.
\end{aligned} \tag{10}$$

и перейдем от изображений к оригиналу.

$$\begin{aligned}
L^{-1} \left[ \frac{\frac{M_T}{\alpha}}{p} - \frac{\frac{M_T}{\alpha}p + \frac{M_T\beta}{\alpha J}}{\left(p + \frac{\beta}{2J}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}\right)^2} \right] &= \frac{M_T}{\alpha} - \frac{M_T}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\beta}{2J}t} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}t\right) - \\
&- \frac{M_T\beta}{\alpha\sqrt{4\alpha J - \beta^2}} \cdot e^{-\frac{\beta}{2J}t} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{4\alpha J - \beta^2}}{2J}t\right).
\end{aligned} \tag{11}$$

Рассмотрим вторую дробь.



числовом виде для получения более точных значений. Также в числовом виде отображаются мгновенные значения токов двигателей и углов в радианах и импульсах.

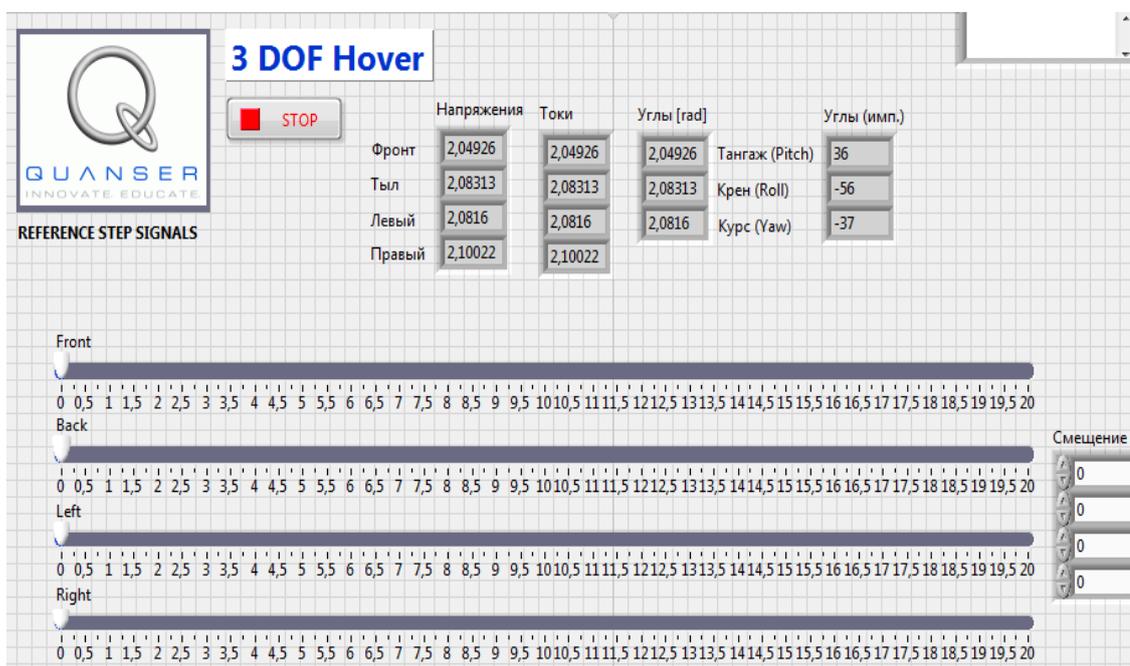


Рис. 4. Лицевая панель виртуального прибора

Подадим на все моторы напряжение 3В для того, чтобы преодолеть постоянную составляющую силы тяги винта. На фронтальный двигатель дополнительно подадим различные значения напряжения, фиксируя при этом угол отклонения по тангажу. Учитывая, что макет статичен в наклоненном положении, момент вязкого трения будет равен нулю. Воспользовавшись выражением (2) можно рассчитать значение коэффициента возвращающего момента. В среднем значение этого коэффициента равно 0.383. В дальнейшем при расчетах будет использоваться именно оно.

Для экспериментальной идентификации значения момента инерции в пакете LabVIEW был реализован виртуальный прибор, блок-схема которого представлена на рис. 5. В ней заданное напряжение (полка реле) подаётся на передний двигатель, если угол тангажа меньше нуля, и на задний двигатель, если угол тангажа больше нуля. Тем самым реализуется релейная обратная связь. В такой системе существуют автоколебания. Для исключения перемещения по углу рыскания на правый и левый двигатели подается половинное значение напряжения от подаваемого на передний и задний двигатели.

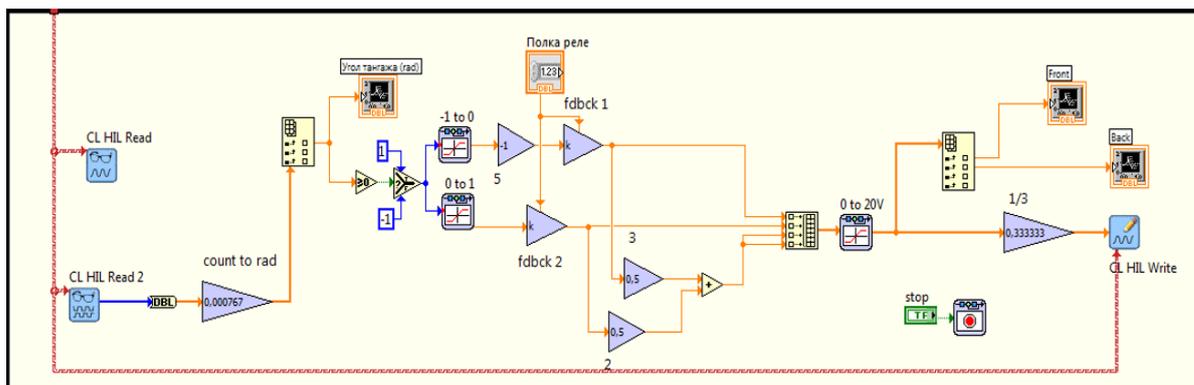


Рис. 5. Блок-схема автоколебательной системы

На лицевой панели виртуального прибора, изображенной на рис. 6, в окне «Полка реле [В]» задается значение подаваемого напряжения. Ниже отображаются графики подачи напряжения на передний (Front) и задний (Back) двигатели. Справа выводится график изменения угла тангажа.

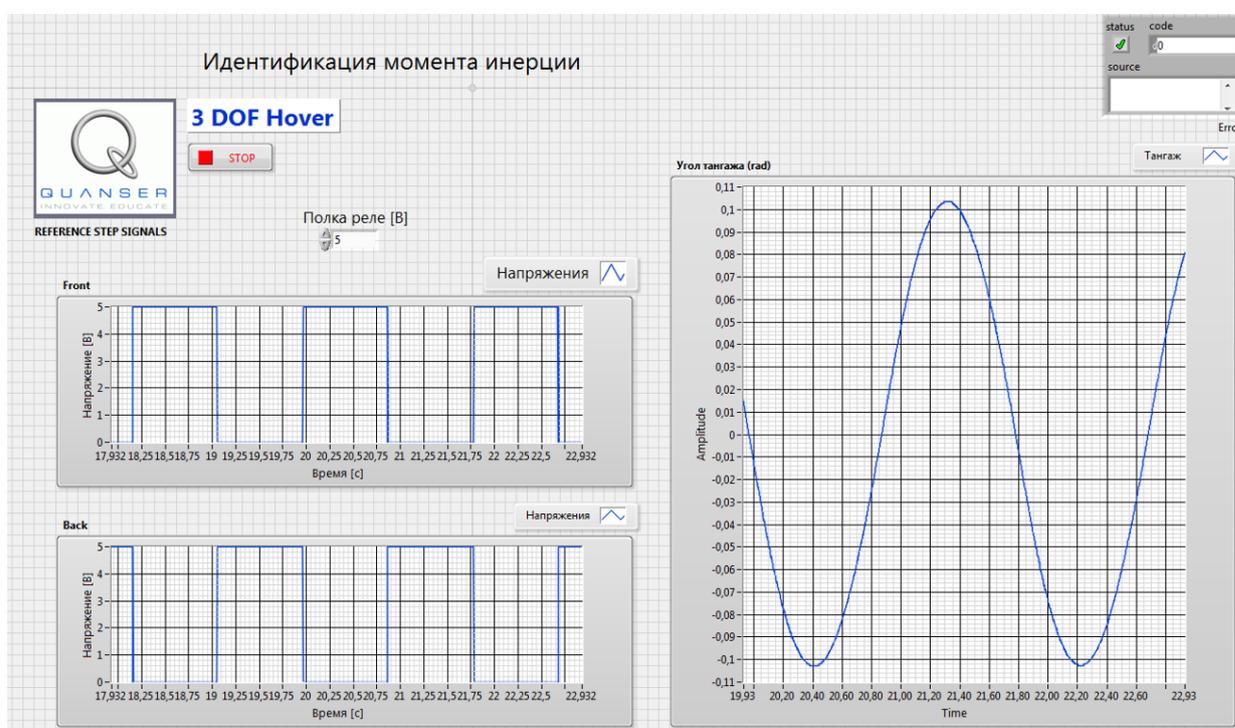


Рис. 6. Лицевая панель виртуального прибора

По полученной в лабораторной работе №3 аппроксимации вычисляются значения силы тяги винта для соответствующих напряжений, подаваемых на передний и задний двигатели. На графике изменения угла тангажа фиксируются максимальные значения угла тангажа  $\theta_{\max}$  и соответствующее ему время  $T$ , т.е. начальные условия, необходимые для решения дифференциального уравнения.

Для расчетов следует взять значение времени  $t_1$  в момент, когда угол тангажа равен нулю при переходе с участка разгона к торможению, и значения времени  $t_2$  и соответствующего ему угла тангажа  $\theta_2$  на участке разгона. По

ним рассчитывались момент инерции и коэффициент момента вязкого трения согласно формуле (14). Результаты занести в таблицу.

*Порядок выполнения работы*

1. Провести измерения и заполнить приведённую ниже таблицу.

Таблица  
«Результаты эксперимента»

U, В	F, Н	$\theta_{\max}$ , рад	T, с	t <sub>1</sub> , с	$\theta_2$ , рад	t <sub>2</sub> , с	$\beta$	J, кг·м <sup>2</sup>
7								
7.5								
8								
8.5								
9								

2. Сравнить полученные значения с паспортными данными стенда.
3. Сделать выводы.

*Лабораторная работа №6*

**Формирование матмодели стенда с экспериментально определёнными параметрами. Оценка адекватности модели.**

*Цель работы:* построить модель стенда в виде Simulink-схемы. Включить в неё регулятор, рассчитанный по методу АКОР. Промоделировать сформированную схему с рассчитанным регулятором и сравнить результаты моделирования с экспериментальными результатами, полученными непосредственно на стенде. Сделать выводы об адекватности полученной модели. Высказать гипотезы и предположения относительно неучтённых факторов и по уточнению модели и предложить меры по уточнению модели.

**Литература**

1. Майк Диккенс. Ускоренное прототипирование и полунатурное моделирование.//Control Engineering Россия. [Электронный ресурс]. - <http://controleng.ru/programmnye-sredstva/uskorennoe-prototipirovanie-i-polunaturnoe-modelirov/>

2. Официальный сайт компании Quanser inc. [Электронный ресурс]. - <http://www.quanser.com/>

3. Квадрокоптер. Руководство по эксплуатации лабораторной установки. Quanser inc