



# РУКОВОДСТВО ДЛЯ СТУДЕНТА

Эксперименты с Qube-servo для пользователей LabVIEW™

Соответствует критериям оценки ABET\*

Разработчики:

Jacob Apkarian, Ph.D., Quanser

Michel Lévis, M.A.Sc., Quanser

Образовательные решения  
QUBE работают на базе



Материалы курса  
соответствуют:



**УВЛЕКАТЬ. МОТИВИРОВАТЬ. ОБУЧАТЬ.**

\*ABET Inc., является признанным аккредитирующим органом для программ колледжей и университетов в области прикладной науки, вычислительной техники, машиностроения и технологии, обеспечивая руководство и качество в сфере высшего образования более 75 лет.



# 1. ИНТЕГРАЦИЯ QUBE-SERVO

## Рассматриваемые темы

- Ознакомление с оборудованием Quanser QUBE-Servo.
- Использование **LabVIEW™** для взаимодействия с системой Quanser QUBE-Servo.
- Калибровка датчиков.

## Предварительные требования

- QUBE-Servo установлена и протестирована. Изучите руководство QUBE-Servo Quick Start Guide для получения дополнительной информации.
- Инерциальный нагрузочный диск смонтирован на QUBE-Servo.
- У вас есть руководство пользователя QUBE-Servo User Manual. Оно потребуется для выполнения некоторых упражнений.
- Вы знакомы с основами **LabVIEW™**.

# 1. Вводная информация

## 1.1. Использование LabVIEW с комплектом Quanser для быстрого прототипирования систем управления

Комплект программного обеспечения (ПО) Quanser для быстрого прототипирования систем управления (*Quanser Rapid Control Prototyping Toolkit®*) применяется совместно с LabVIEW™ для взаимодействия с оборудованием QUBE-Servosystem. LabVIEW™ используется для управления двигателем постоянного тока и считывания углового положения диска.

Основные этапы разработки виртуального прибора (VI) LabVIEW™ с помощью комплекта ПО Quanser, реализующие взаимодействие с оборудованием QUBE-Servo и быстрое прототипирование систем управления (RCP):

1. Создание виртуального прибора (VI) LabVIEW™, который взаимодействует с установленным устройством сбора данных при помощи блоков из палитры *Quanser Rapid Control Prototyping*.
2. Запуск VI.

Чтобы посмотреть примеры VI, использующих RCP, откройте в LabVIEW™ выберите в меню *Help | Find Examples* и найдите раздел *Toolkits and Modules | Quanser Rapid Control Prototyping*.

## 1.2. Двигатель постоянного тока

Двигатели постоянного тока используются в различных приложениях. Как обсуждалось в руководстве пользователя QUBE-Servo User Manual, QUBE-Servo содержит коллекторный двигатель постоянного тока, подключенный к усилителю сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Откройте руководство пользователя QUBE-Servo для получения дополнительной информации.

## 1.3. Энкодеры

Как и вращающиеся потенциометры, энкодеры также могут использоваться для измерения углового положения. Существует много типов энкодеров, но самый распространенный – инкрементный вращающийся оптический энкодер, например, такой, как изображен на рисунке 1.1. В отличие от потенциометров, энкодеры являются относительными датчиками. Измеряемый ими угол зависит от последнего положения и последней подачи питания. Однако следует отметить, что существуют и абсолютные энкодеры.



Рисунок 1.1: Инкрементный вращающийся оптический энкодер US Digital.

В энкодере есть кодирующий диск, размеченный образцовыми радиальными шаблонами. Диск соединен с валом двигателя постоянного тока. Когда вал вращается, свет от светодиода проходит через эти шаблоны и фиксируется фотодатчиком. При этом генерируются сигналы А и В, показанные на рисунке 1.2. На каждый полный оборот диска формируется импульс индекса, который может применяться для калибровки или установки системы в исходное состояние.

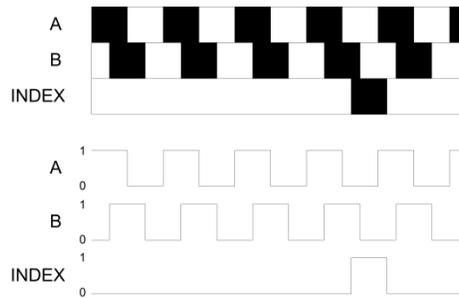
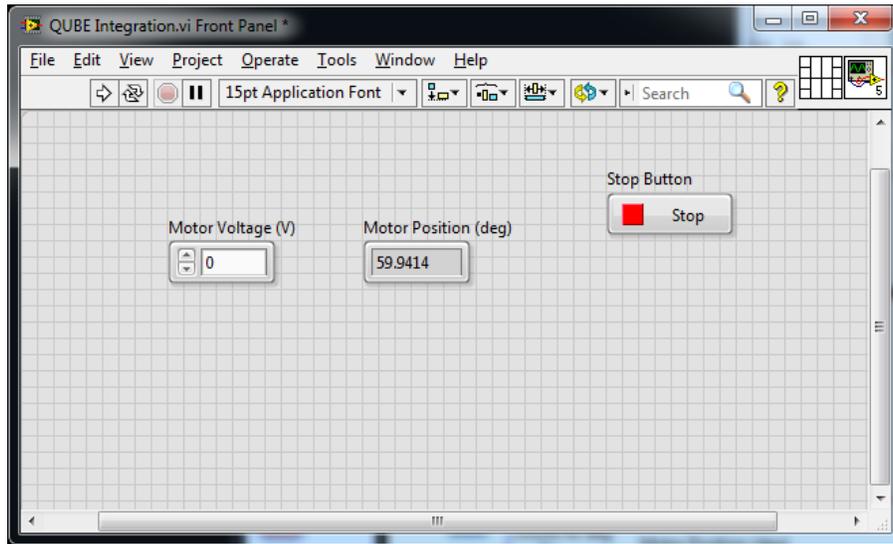


Рисунок 1.2: Сигналы инкрементного оптического энкодера

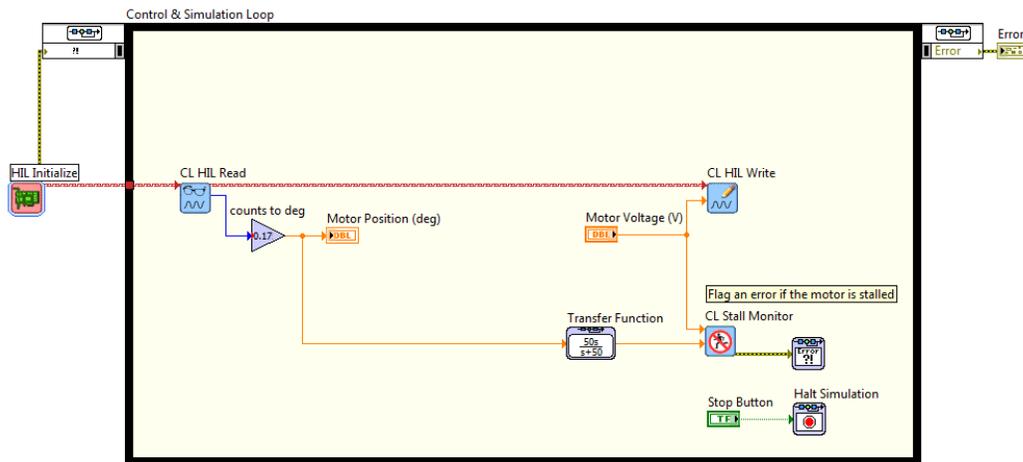
Сигналы А и В, генерируемые при вращении вала, используются алгоритмом декодирования для формирования числа. Разрешение энкодера зависит от кодового шаблона диска и декодера. Например, энкодер с 512 оптическими метками на диске может сгенерировать всего 512 импульсов за каждый оборот вала энкодера. Однако в квадратурном энкодере с тем же кодовым шаблоном, показанном на рисунке 1.2, количество импульсов (и, соответственно, разрешение) увеличивается в 4 раза, то есть энкодер сгенерирует 2048 импульсов за оборот. Это можно объяснить смещением между шаблонами А и В: вместо одной полосы меток, которые включают, или выключают фотодатчик, используются две полосы, метки которых могут находиться в различных комбинациях состояний включено/выключено до повтора цикла. Это смещение позволяет энкодеру определять и направление вращения, так как последовательность состояний вкл/выкл различается при движении по и против часовой стрелки.

## 2. Задание на лабораторную работу

В этой лабораторной работе мы, в соответствии с рисунком 2.1, создадим виртуальный прибор (VI) **LabVIEW™** при помощи блоков **Quanser Rapid Control Prototyping Toolkit®**, чтобы управлять двигателем и измерять угол поворота вала.



(а) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма (Block Diagram)

Рисунок 2.1: VI, используемый с RCP для управления двигателем и считывания угла поворота QUBE-Servo

### 2.1. Настройка LabVIEW VI для QUBE-Servo

Выполните следующие шаги, чтобы создать **LabVIEW™** VI, который будет взаимодействовать с QUBE-Servo с помощью **Quanser Rapid Control Prototyping Toolkit®**:

1. Запустите **LabVIEW™**.
2. Создайте новый VI из шаблона *Quanser Basic Hardware Loop*.
3. Щелкните дважды по входному узлу **Simulation Loop** (или щелкните правой кнопкой мыши по границе и

выберите *Configure Simulation Parameters*) для доступа к окну *Configure Simulation Parameters* (настройка параметров симуляции), показанному на рисунке 2.2.

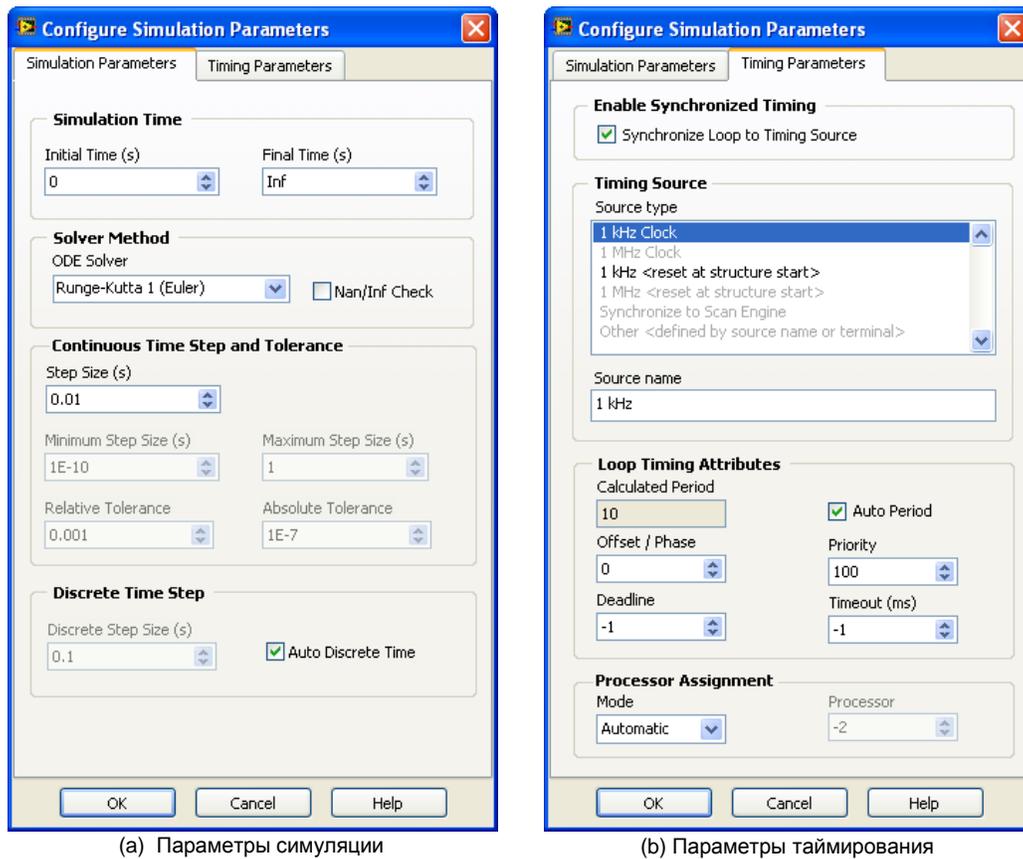


Рисунок 2.2: Диалог Simulation Loop Parameters

4. Как показано на рисунке 2.2, задайте следующие настройки на закладке *Simulation Parameters*:

- Final time (s): Inf
- ODE Solver: Runge-Kutta 1 (Euler)
- Step Size (s): 0.002

При таких настройках симуляция будет выполняться с частотой дискретизации 500 Гц до тех пор, пока пользователь ее не остановит. Для управления можно использовать любой из методов решения уравнений, но по умолчанию применяется метод Рунге-Кутты 1.

5. Как показано на рисунке 2.2, задайте следующие настройки в на закладке *Timing Parameters*:

- Выберите *Synchronize Loop to Timing Source*
- Timing Source: 1 kHz Clock
- Выберите *Auto Period*

Это синхронизирует симуляцию с таймером персонального компьютера (ПК). В противном случае симуляция будет выполняться максимально быстро (что хорошо, если выполняется только симуляция, но, как правило, нежелательно при работе с оборудованием).

6. Щелкните по кнопке ОК, чтобы принять изменения.

7. Дважды щелкните по блоку HIL Initialize.

8. В поле *Board type* выберите разъем MXP, который вы подключили к панели QUBE-Servo myRIO (например, *qube\_servo\_myrio\_mxp\_a* в разделе *Quanser Devices*).

**Пользователи внешних DAQ-устройств:** Если вы используете внешнее устройство сбора данных, выберите плату, установленную в ваш ПК. Например, если вы используете плату Quanser Q8-USB для подключения к QUBE-Servo, то выберите *q8\_usb*.

9. Запустите VI, щелкнув по белой стрелке в верхнем левом углу. Светодиод *Power* (питание) QUBE-Servo (или вашей DAQ платы) должен мигать.

10. Если вы успешно запустили VI без каких-либо ошибок, вы можете остановить его выполнение, щелкнув по кнопке Abort.

## 2.2. Считывание показаний энкодера

Выполните следующие шаги, чтобы считать показания энкодера:

1. Добавьте HIL Read VI из палитры *Quanser Rapid Control Prototyping*.
2. Подключите терминал *board out* HIL Initialize к терминалу *board in* HIL Read, как показано на рисунке 2.1.
3. Щелкните дважды по HIL Read, чтобы настроить канал энкодера.
4. Выберите вариант *Encoder (Scalar)* этого полиморфного VI, как показано на рисунке 2.3, чтобы считать канал энкодера #0.

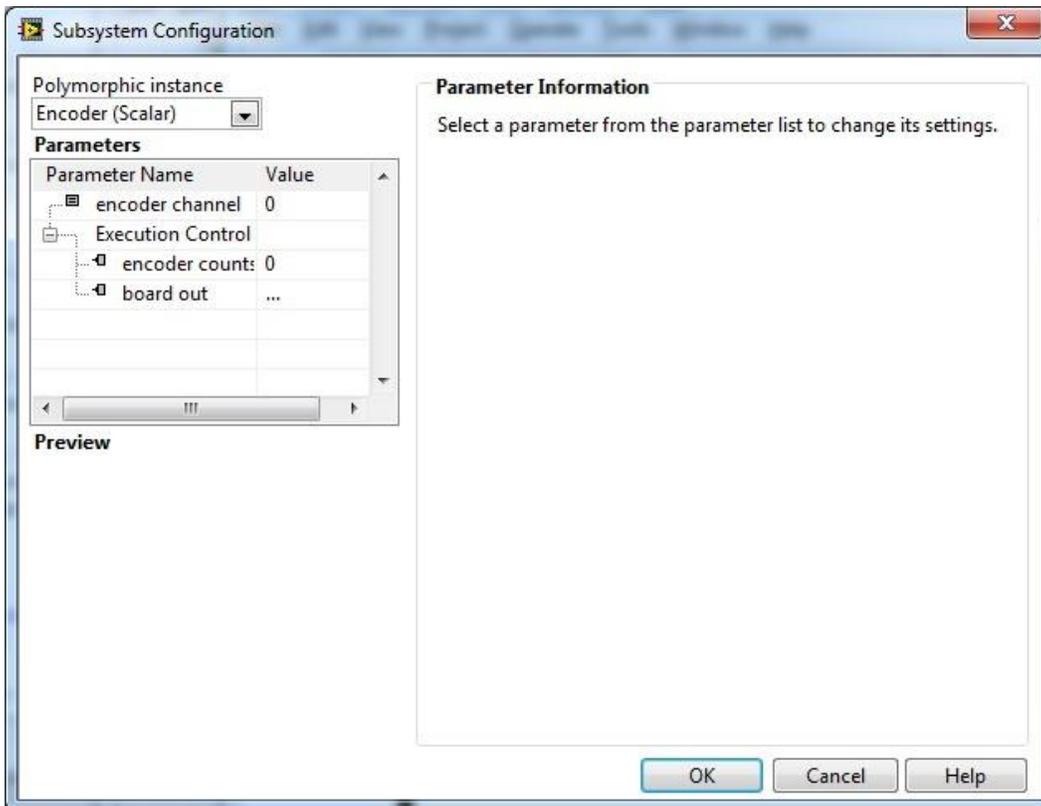


Рисунок 2.3: Настройка HIL Read

5. Подключите HIL Read к блоку Gain и числовому индикатору, как показано на рисунке 2.1 (без блока

HIL Write Analog).

- Вы можете найти блок Gain в палитре *Control Design & Simulation | Simulation | Signal Arithmetic*.
  - Индикатор можно добавить, щелкнув правой кнопкой мыши по выходу Gain и выбрав *Create | Indicator*.
6. Перейдите на лицевую панель. Вы должны увидеть числовой индикатор.
  7. Запустите VI.
  8. Покрутите диск вперед и назад. Числовой индикатор показывает количество импульсов, сформированное энкодером. Это количество пропорционально углу поворота диска.
  9. Что происходит с показаниями энкодера при каждом запуске VI? Остановите VI, крутаните диск и снова запустите VI. Что вы заметили в показаниях энкодера при повторном запуске VI?
  10. Подсчитайте количество импульсов энкодера за один полный оборот. Кратко объясните, как вы это сделали, и проверьте, совпадает ли полученное вами значение с указанным в спецификации, приведенной в руководстве пользователя QUBE-Servo User Manual.
  11. В конечном счете, мы хотим, чтобы угол отображался в градусах, а не в количестве импульсов. Задайте блоку Gain значение, преобразующее импульсы в градусы. Это значение называется *коэффициентом преобразования датчика (sensor gain)*. Запустите VI и убедитесь в том, что числовой индикатор правильно показывает угол поворота диска.

## 2.3. Управление двигателем постоянного тока

1. Добавьте блок HIL Write из палитры *Quanser Rapid Control Prototyping*. Этот блок используется для формирования сигнала с канала аналогового вывода #0 устройства сбора данных. Этот канал подключен ко встроенному усилителю ШИМ, который управляет двигателем.
2. Подключите терминал *board out* HIL Read к терминалу *board in* HIL Write.
3. Добавьте числовой элемент управления, щелкнув правой кнопкой по терминалу *analog voltage* HIL Write и выбрав *Create | Control*. Соедините блоки Constant и HIL Write Analog, как показано на рисунке 2.1.
4. Вместо использования кнопки Abort на панели инструментов VI, лучше добавить вашу собственную функцию для останова. Чтобы реализовать функцию останова, как показано на рисунке 2.1, выполните следующие действия:
  - (a) Добавьте блок Halt Simulation из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Utilities*.
  - (b) Чтобы добавить кнопку Stop, перейдите на лицевую панель VI и откройте палитру *Silver | Boolean* (либо *Modern | Boolean*).
  - (c) На блок-диаграмме соедините кнопку Stop и Halt Simulation VI, как показано на рисунке 2.1.

**Примечание:**

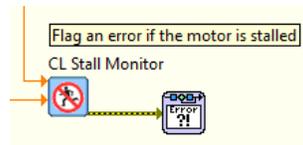


Рисунок 2,4: HIL Stall Monitor

Мы рекомендуем использовать блок CL Stall Monitor, как показано на рисунках 2.1 и 2.4. Этот блок будет наблюдать за приложенным напряжением и скоростью двигателя постоянного тока и обеспечивать останов двигателя, если он находится без движения более 20 с при приложенном напряжении 5В и выше. Это необходимо для предотвращения повреждения двигателя.

5. Запустите VI.
6. Задайте значение блока Constant равным 0.5. При этом на двигатель в QUBE-Servo будет подано напряжение 0.5 В. Убедитесь в том, что мы получаем *положительные значения результатов измерений при подаче положительного сигнала*. Это важно, особенно в системах управления, где предполагается, что результаты измерения возрастают при подаче на вход положительного управляющего сигнала. Наконец, в каком направлении вращается диск (по часовой стрелке или против), если на вход подан положительный сигнал?
7. Щелкните по кнопке Stop, чтобы остановить VI.
8. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения

Quanser Inc.



## 2. Фильтрация

### Рассматриваемые темы

- Использование энкодера для измерения скорости.
- Фильтры нижних частот.

### Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo"

# 1. Вводная информация

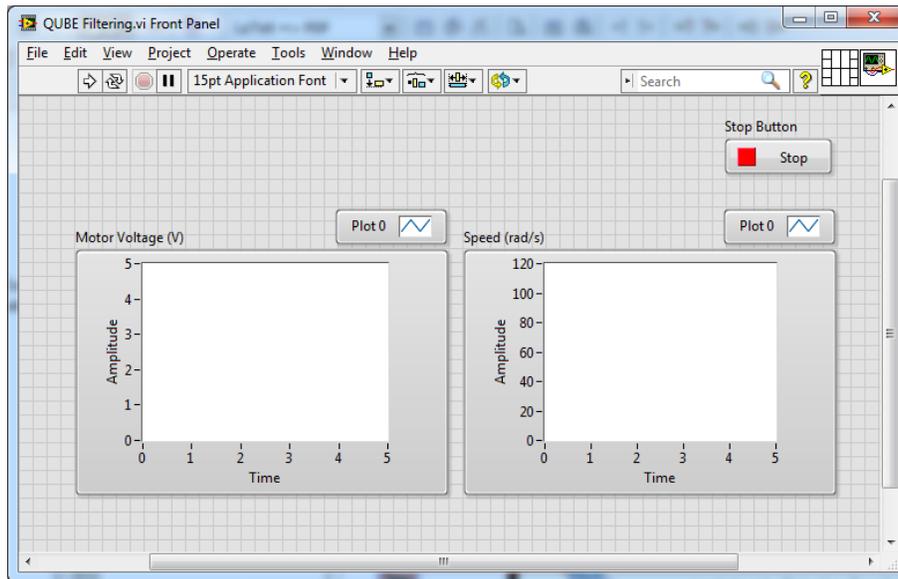
Фильтр нижних частот используется для подавления высокочастотных компонент сигнала. Передаточная функция фильтра нижних частот первого порядка имеет вид

$$G(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f}, \quad (1.1)$$

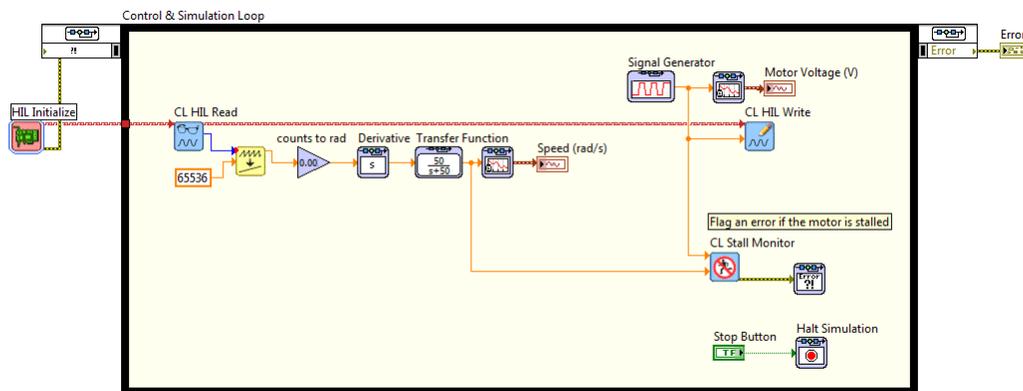
где  $\omega_f$  - частота среза фильтра в радианах в секунду (рад/с). Все компоненты более высокой частоты будут ослаблены, по меньшей мере, на  $-3\text{дБ} \approx 50\%$ .

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - спроектировать VI, показанный на рисунке 2.1, который измеряет скорость двигателя при помощи энкодера. За основу можно взять VI, разработанный в лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo".



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Измерение скорости с помощью энкодера

1. Возьмите модель, разработанную вами в лабораторной работе «Интеграция QUBE-Servo». Измените коэффициент калибровки энкодера, чтобы измерять положение диска в радианах, а не в градусах, как в предыдущей лабораторной работе.
2. Создайте VI, показанный на рисунке 2.1, но пока что не включайте блок Transfer Fcn (мы добавим его позже).
  - **Inverse Modulus:** Разрядность счетчиков DAQ определяет диапазон возможных показаний. Для устранения скачка, который происходит при достижении энкодером границ диапазона, добавьте в VI блок Inverse Modulus из палитры *Rapid Control Prototyping | Utilities*, как показано на рисунке

- 2.1. Подключите константу со значением размера вашего буфера DAQ к терминалу *Modulus*. Например, в myRIO DAQ встроены 32-разрядные счетчики, поэтому необходимо ввести в константу значение **4294967296**; Quanser Q8-USB DAQ содержит 16-разрядные счетчики, для которых необходимо ввести значение **65536**.
- **Derivative**: Добавьте блок Derivative к выходу коэффициента калибровки энкодера Gain для измерения скорости вращения при помощи энкодера (в рад/с).
  - **Scope**: Подключите выход Derivative к блоку SimTime Waveform. Этот блок находится в палитре *Control Design & Simulation | Simulation | Graph Utilities*.
3. Добавьте генератор сигналов (Signal Generator) из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Signal Generation*. Настройте генератор на формирование импульсов прямоугольной формы (square) напряжением от 1 до 3 В с частотой 0.4 Гц.
4. Запустите VI. Исследуйте отклик энкодера по скорости. Добавьте в отчет примеры характеристик. Они должны выглядеть, как показано на рисунке 2.2.

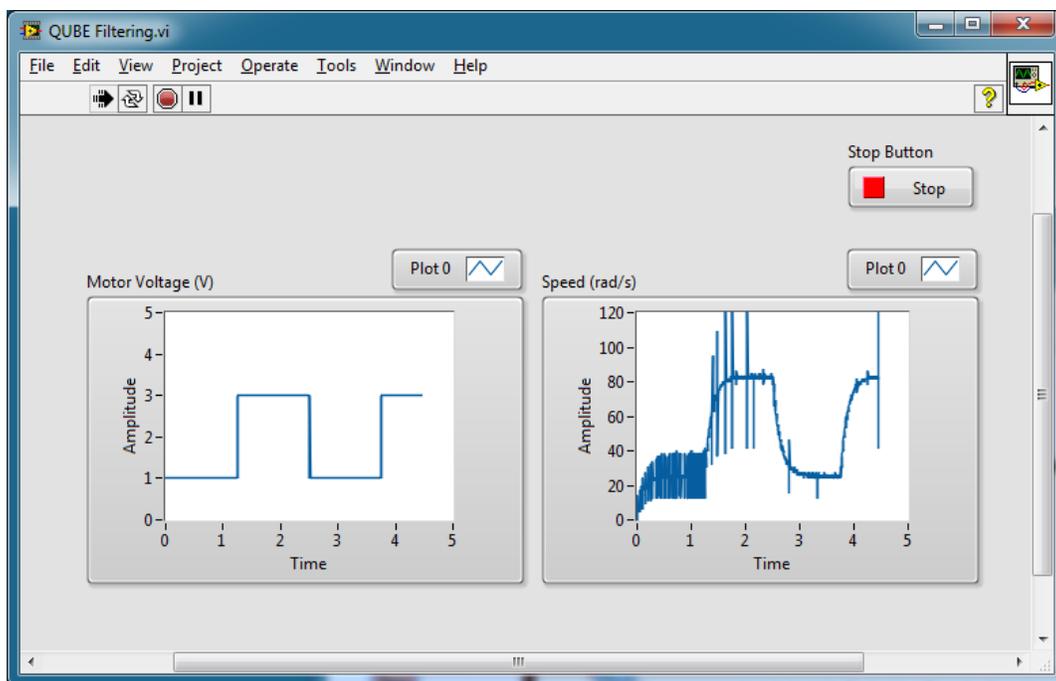


Рисунок 2.2: Измерения скорости двигателя с помощью энкодера

5. Объясните причину зашумленности измерений с помощью энкодера.

**Подсказка:** Для измерения положения используйте новый блок Scope. Увеличьте масштаб отклика по положению и не забудьте, что позже он дифференцируется. Является ли сигнал непрерывным?

6. Один из способов удаления некоторых высокочастотных компонент - добавление фильтра нижних частот (ФНЧ) после дифференцирования. Добавьте блок Transfer Fcn из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Continuous* после взятия производной и подключите ФНЧ к блоку Scope. Задайте для блока Transfer Fcn передаточную функцию, равную  $50/(s + 50)$ , как показано на рисунке 2.1.
7. Запустите VI. Покажите отфильтрованный отклик по скорости и напряжение на двигателе. Улучшилась ли она?
8. Какова частота среза ФНЧ с характеристикой  $50/(s + 50)$ ? Дайте ответ в рад/с и герцах.

9. Изменяйте частоту среза  $\omega_f$  с 10 до 200 рад/с (или от 1.6 до 32 Гц). Как это влияет на отфильтрованный сигнал? Обдумайте преимущества и недостатки уменьшения и увеличения этого параметра.
10. Остановите VI.
11. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
[info@quanser.com](mailto:info@quanser.com)  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

## 3. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ

### Рассматриваемые темы

- Устойчивые, находящиеся вблизи порога устойчивости и неустойчивые системы.
- Отклики по скорости и положению в разомкнутой системе.

### Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".

# 1. Вводная информация

## 1.1. Модель двигателя

Передаточная функция напряжение-скорость QUBE-Servo имеет вид:

$$P_{v-s}(s) = \frac{\Omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (1.1)$$

где  $K = 23.0$  рад/(В·с) - коэффициент пропорциональности модели в установившемся состоянии,  $\tau = 0.13$  с - постоянная времени модели,  $\Omega_m(s) = L\{\omega_m(t)\}$  - скорость двигателя (то есть скорость нагруженного диска), и  $V_m(s) = L\{v_m(t)\}$  - напряжение, поданное на двигатель. При желании вы можете выполнить эксперимент и найти более точные параметры модели  $K$  и  $\tau$  для вашего конкретного двигателя (например, выполнив лабораторную работу "Метод ударных испытаний").

Передаточная функция напряжение-положение такая же, как в уравнении 1.1, с последовательно включенным интегратором

$$P(s) = P_{v-p} = \frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (1.2)$$

где  $\Theta_m(s) = L\{\theta_m(t)\}$  - положение нагруженного механизма.

## 1.2. Устойчивость

Определение устойчивости с ограничением по входу, ограничением по выходу (BIBO):

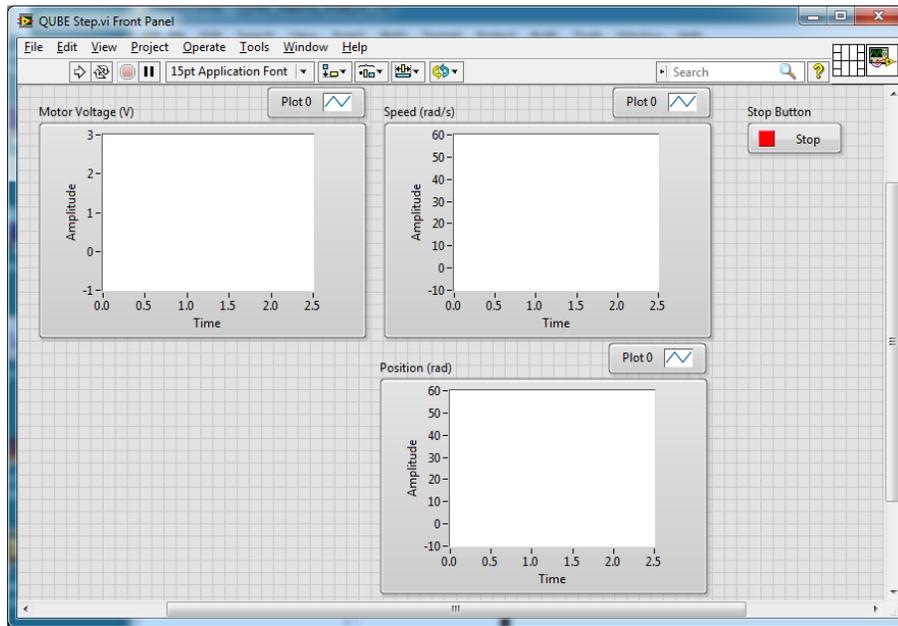
1. Система устойчива, если для каждого ограниченного входного сигнала ограничен выходной сигнал.
2. Система неустойчива, если для любого ограниченного входного сигнала выходной сигнал не является ограниченным.

Устойчивость системы можно определить по ее полюсам:

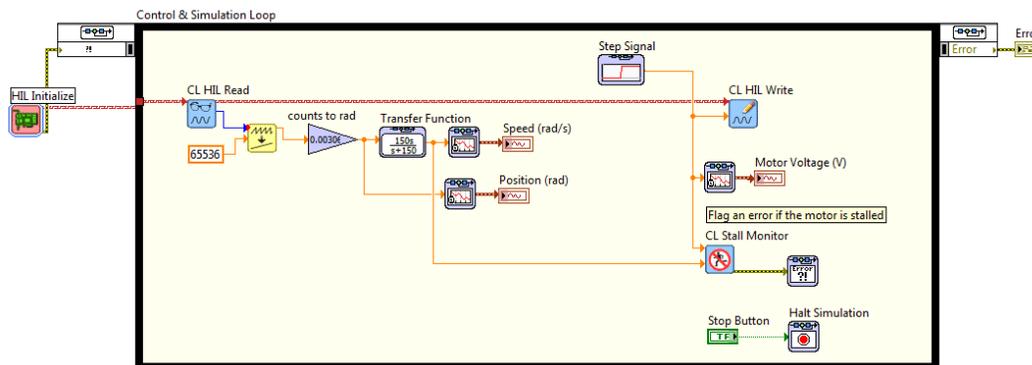
- Полюса стабильной системы находятся только в левой полуплоскости.
- Неустойчивая система имеет, по крайней мере, один полюс в правой полуплоскости и/или полюса кратностью больше 1 на мнимой оси.
- Система, находящаяся на границе устойчивости, имеет один полюс на мнимой оси, а остальные полюса в левой полуплоскости.

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - спроектировать VI, показанный на рисунке 2.1, который подает на двигатель ступенчатое напряжение 1 В и считывает скорость и положение двигателя. За основу можно взять VI, разработанные в лабораторных работах "Интеграция QUBE-Servo" и "Фильтрация".



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Измерение скорости и положения при ступенчатом управляющем напряжении

1. Определите устойчивость системы регулирования напряжение-скорость по ее полюсам.
2. Определите устойчивость системы регулирования напряжение-положение по ее полюсам.
3. Запустите VI, показанный на рисунке 2.1, и подайте единичную ступеньку напряжения на двигатель. Настройте цикл Simulation Loop на выполнение в течение 2.5 с. Переходные характеристики положения и скорости должны быть похожи на показанные на рисунке 2.2.
4. Определите устойчивость системы из отклика по скорости и принципа устойчивости BIBO. Как она соотносится с результатами, полученными из анализа полюсов?

5. Определите устойчивость системы из отклика по положению и принципа устойчивости ВИВО определите устойчивость системы. Как она соотносится с результатами, полученными из анализа полюсов?

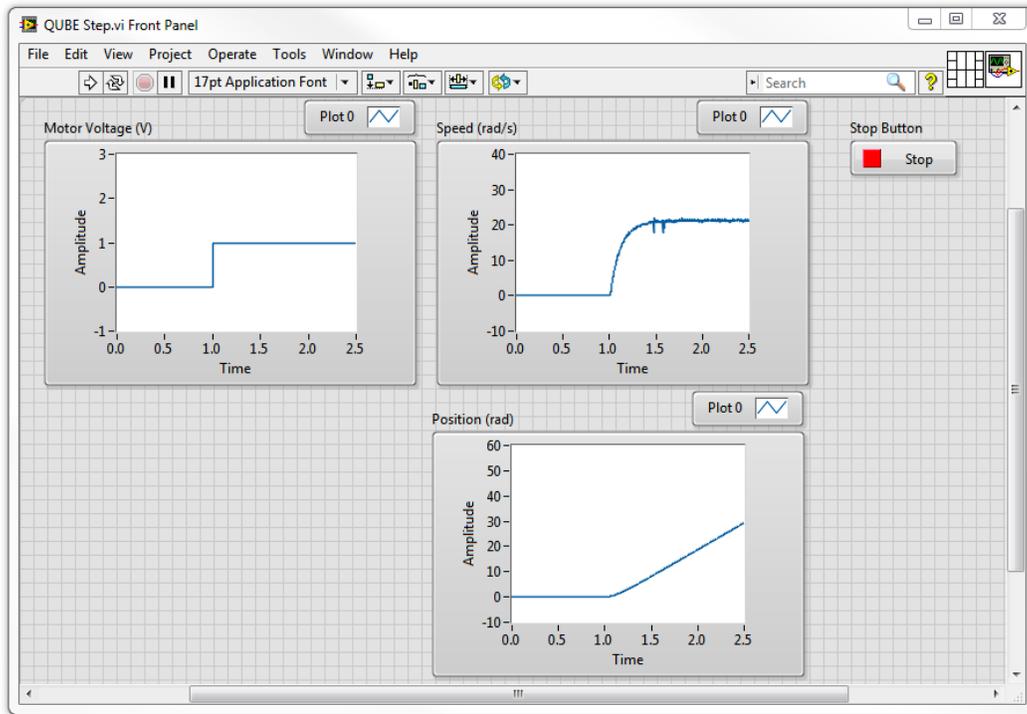


Рисунок 2.2: Переходная характеристика

6. Существует ли входное воздействие, при котором отклик по положению системы с разомкнутой обратной связью обладает устойчивостью ВИВО? Если да, модифицируйте VI, чтобы включить ваше входное воздействие, протестируйте его на двигателе и покажите отклик по положению. Используя полученный результат, ответьте на вопрос: как можно определить запас устойчивости в терминах ограниченного входного сигнала?

**Подсказка:** Попробуйте подать на вход импульс (т.е. короткую ступеньку) или синусоиду, и сравните отклик по положению с переходной характеристикой, наблюдаемой ранее.

7. Остановите VI.  
8. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефоне: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.



## 4. МЕТОД УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

### Рассматриваемые темы

- Передаточные функции первого порядка.
- Получение модели QUBE-Servo при помощи метода ударных испытаний.
- Проверка модели.

### Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".

# 1. Вводная информация

Метод ударных испытаний – простой тест, основанный на переходной характеристике устойчивой системы. На систему подается входной сигнал ступенчатой формы и регистрируется ее отклик. Рассмотрим, например, систему, заданную следующей передаточной функцией:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

Переходная характеристика, показанная на рисунке 1.1, сформирована передаточной функцией с  $K = 5$  рад/В-с и  $\tau = 0.05$  с.

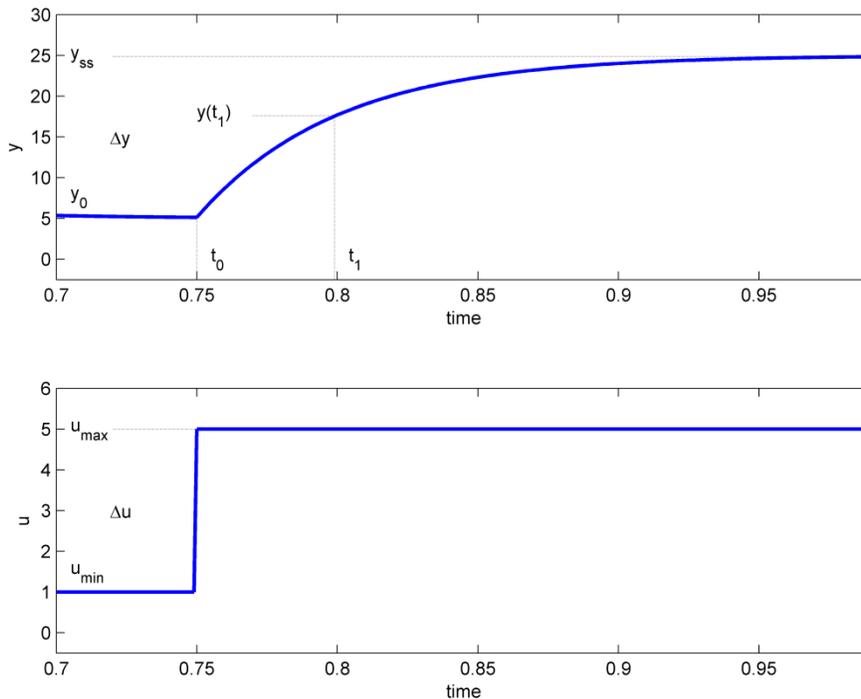


Рисунок 1.1: Входной и выходной сигналы, используемые в методе ударных испытаний

Входной ступенчатый сигнал начинается в момент времени  $t_0$  и принимает минимальное значение  $u_{min}$  и максимальное значение  $u_{max}$ . Результирующий выходной сигнал сначала равен  $y_0$ . При подаче ступенчатого воздействия выходной сигнал в конце концов устанавливается равным постоянному значению  $y_{ss}$ . Коэффициент передачи в установившемся состоянии равен отношению выходного и входного сигналов

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1.2)$$

где  $\Delta y = y_{ss} - y_0$  и  $\Delta u = u_{max} - u_{min}$ . Постоянная времени системы  $\tau$  определяется, как время, которое требуется отклику системы на ступенчатое воздействие, чтобы достичь  $1 - 1/e \approx 63.2\%$  от установившегося значения, например, для рисунка 1.1

$$t_1 = t_0 + \tau, \quad (1.3)$$

где

$$y(t_1) = 0.632\Delta y + y_0. \quad (1.3)$$

Тогда по характеристике на рисунке 1.1 мы можем узнать время  $t_1$ , которое соответствует значению  $y(t_1)$ . Из рисунка мы видим, что время  $t_1$  равно:

$$t_1 = t_0 + \tau$$

откуда постоянная времени модели равна

$$\tau = t_1 - t_0 \quad (1.4)$$

## 1.1. Применение к QUBE-Servo

Возвращаясь к системе QUBE-Servo, в  $s$ -области ступенчатое входное напряжение с задержкой по времени  $t_0$  имеет вид

$$V_m(s) = \frac{A_v e^{-st_0}}{s}, \quad (1.5)$$

где  $A_v$  - амплитуда ступеньки, а  $t_0$  время до ступеньки (то есть задержка).

Передаточная функция напряжение-скорость имеет вид:

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.6)$$

где  $K$  - коэффициент передачи модели в установившемся режиме,  $\tau$  - постоянная времени модели,  $\Omega_m(s) = L[\omega_m(t)]$  - скорость нагруженного устройства,  $V_m(s) = L[v_m(t)]$  - поданное на двигатель напряжение.

Если подставить входное воздействие 1.5 в передаточную функцию системы 1.6, получим:

$$\Omega_m(s) = \frac{K A_v e^{-st_0}}{(\tau s + 1)s}.$$

Далее мы можем найти реакцию скорости двигателя QUBE-Servo во временной области  $\omega_m(t)$  на ступенчатое воздействие, взяв обратное преобразование Лапласа этого уравнения

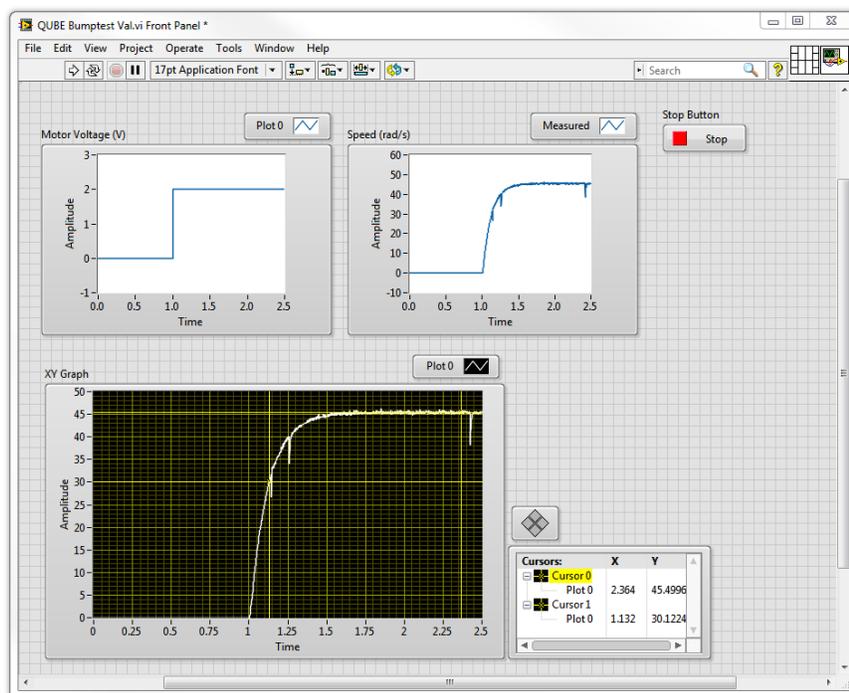
$$\omega_m(t) = K A_v \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right) + \omega_m(t_0),$$

обратив внимание на начальные условия  $\omega_m(0^-) = \omega_m(t_0)$ .

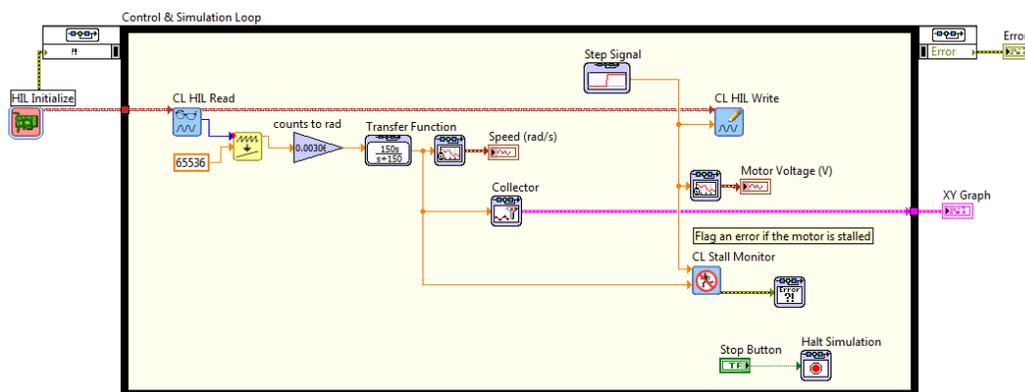
## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - создать VI, показанный на рисунке 2.1, который подает на двигатель ступенчатое напряжение 2 В и считывает скорость двигателя с помощью энкодера. За основу можно взять VI, разработанные в лабораторных работах "Интеграция QUBE-Servo" и "Фильтрация".

Чтобы обеспечить длительность сигнала в 2.5 с, задайте финальное время (*Final Time*) цикла Simulation Loop равным 2.5 (вместо *Inf*). Параметры модели можно найти, используя сохраненную характеристику по методике из раздела "Вводная информация" данной лабораторной работы. Как показано на рисунке 2.1, отклик системы на ударное воздействие "сохраняется" с помощью блока Collector из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Utilities* и отображается на графическом индикаторе XY Graph. Графические индикаторы LabVIEW типа graph, в отличие от типа chart, имеют курсоры, облегчающие выполнение измерений.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Подача ступеньки напряжения и измерение соответствующей скорости двигателя

1. Запустите VI для подачи на двигатель напряжения 2 В. Наблюдаемый отклик должен быть похож на изображенный на рисунке 2.2.

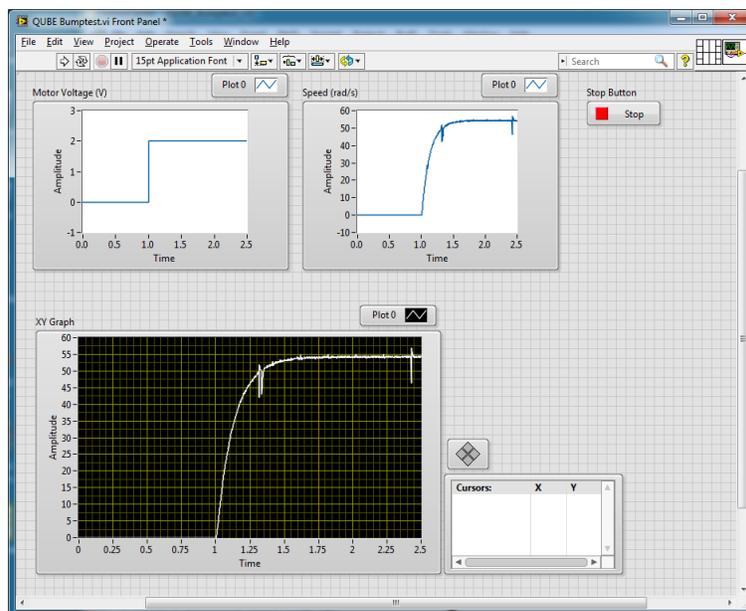


Рисунок 2.2: Отклик QUBE-Servo на ударное тестовое воздействие

2. Подготовьте график отклика двигателя по скорости и график входного напряжения. Вы можете использовать функцию *Export | Export Simplified Image* для сохранения результатов измерения скорости нагрузки/диска и напряжения на двигателе в файл рисунка, который можно вставить в отчет.
3. По измеренной переходной характеристике найдите коэффициент передачи в установившемся режиме.

**Подсказка:** Используйте палитру *Cursor* графического индикатора XY Graph для измерения координат точек на графике.

4. Найдите постоянную времени по измеренной переходной характеристике.
5. Чтобы проверить, верны ли найденные вами параметры модели  $K$  и  $\tau$ , добавьте в VI блок Transfer Function для модели первого порядка из уравнения 1.1, как показано на рисунке 2.3. Отобразите измеренную и смоделированную характеристики QUBE-Servo на одном графике (используйте функцию Build Array из палитры Array). Запустите VI. Добавьте в отчет изображение, содержащее на одном графике измеренную и смоделированную характеристику, а также входное напряжение.

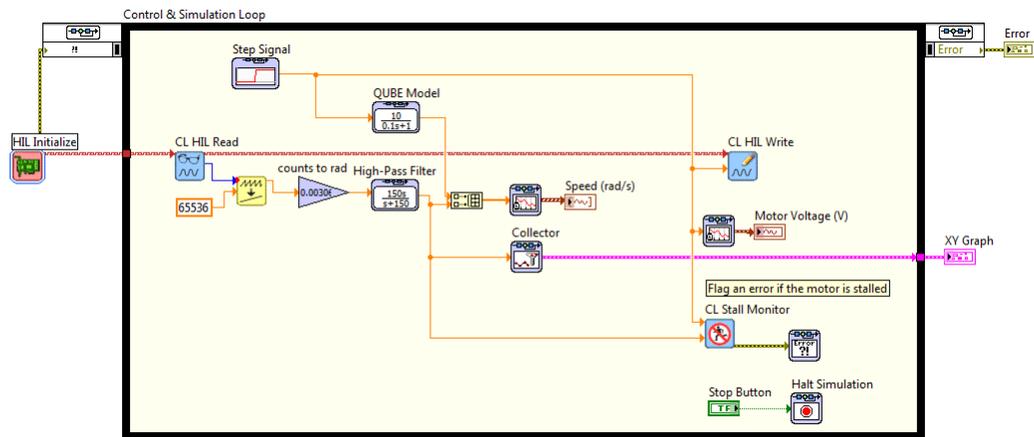


Рисунок 2.3: Проверка модели ударных испытаний

6. Значения параметров  $K$  и  $\tau$  получились правильными? Объясните.
7. Остановите VI.
8. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.



# 5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

## Рассматриваемые темы

- Получение уравнений движения вращающегося серводвигателя на примере двигателя постоянного тока.
- Создание и проверка модели системы.
- Проверка модели.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".

# 1. Вводная информация

Quanser QUBE-Servo является системой с непосредственным управлением вращающегося механизма. Электрическая схема якорной цепи электродвигателя приведена на рисунке 1.1, а электрические и механические параметры - в таблице 1.1. Вал двигателя постоянного тока соединен со *ступицей нагрузки*. Ступица представляет собой металлический диск с моментом инерции  $J_h$ , к которому крепится диск или поворотный маятник. Нагрузочный диск крепится к внешнему валу с моментом инерции  $J_d$ .

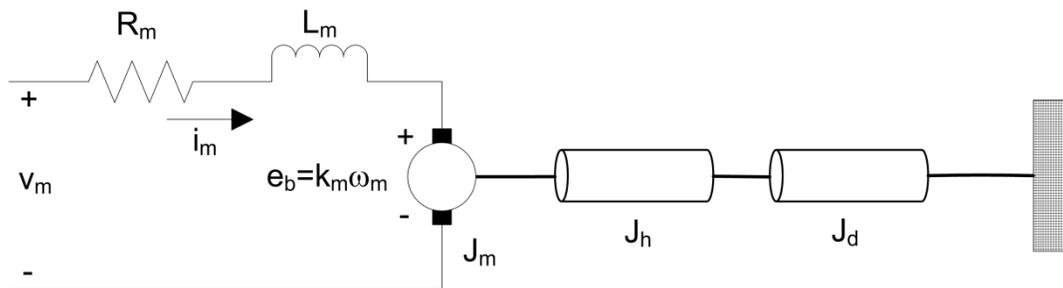


Рисунок 1.1: Двигатель постоянного тока и нагрузка QUBE-Servo

Напряжение противоЭДС  $e_b(t)$  зависит от скорости вала двигателя  $\omega_m$  и коэффициента противоЭДС двигателя  $k_m$ . Полярность ЭДС противоположна направлению тока. Напряжение противоЭДС имеет вид:

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t)$$

| Символ                            | Описание                         | Значение                                |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| <b>Двигатель постоянного тока</b> |                                  |   |
| $R_m$                             | Сопrotивление между контактами   | 6.3 Ом                                  |
| $k_t$                             | Коэффициент момента              | 0.036 Н-м/А                             |
| $k_m$                             | Коэффициент противоЭДС двигателя | 0.036 В/(рад/с)                         |
| $J_m$                             | Момент инерции ротора            | $4.0 \times 10^{-6}$ кг-м <sup>2</sup>  |
| $L_m$                             | Индуктивность ротора             | 0.85 мГн                                |
| $m_h$                             | Масса ступицы                    | 0.0087 кг                               |
| $r_h$                             | Радиус ступицы                   | 0.0111 м                                |
| $J_h$                             | Момент инерции ступицы           | $1.07 \times 10^{-6}$ кг-м <sup>2</sup> |
| <b>Нагрузочный диск</b>           |                                  |   |
| $m_d$                             | Масса нагрузочного диска         | 0.054 кг                                |
| $r_d$                             | Радиус нагрузочного диска        | 0.0248 м                                |

Таблица 1.1: Параметры системы QUBE-Servo

В соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - L_m \frac{di_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0.$$

Поскольку индуктивность двигателя  $L_m$  гораздо меньше его активного сопротивления, индуктивным сопротивлением можно пренебречь. Тогда уравнение принимает вид

$$v_m(t) - R_m i_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0.$$

Решив относительно  $i_m(t)$  найдем ток в двигателе:

$$i_m(t) = \frac{v_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m}. \quad (1.1)$$

Уравнение для вала двигателя можно записать в виде

$$J_{eq} \dot{\omega}_m(t) = \tau_m(t),$$

где  $J_{eq}$  - полный момент инерции, действующий на вал двигателя, а  $\tau_m$  – момент, создаваемый двигателем, который зависит от тока и равен

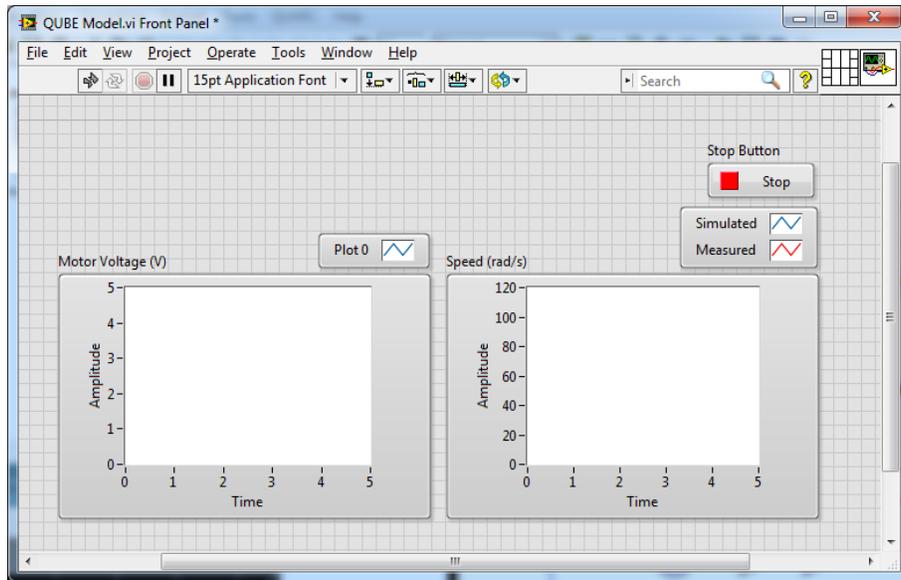
$$\tau_m = k_m i_m(t) \quad (1.2)$$

Момент инерции диска массой  $m$  и радиусом  $r$  относительно оси вращения равен

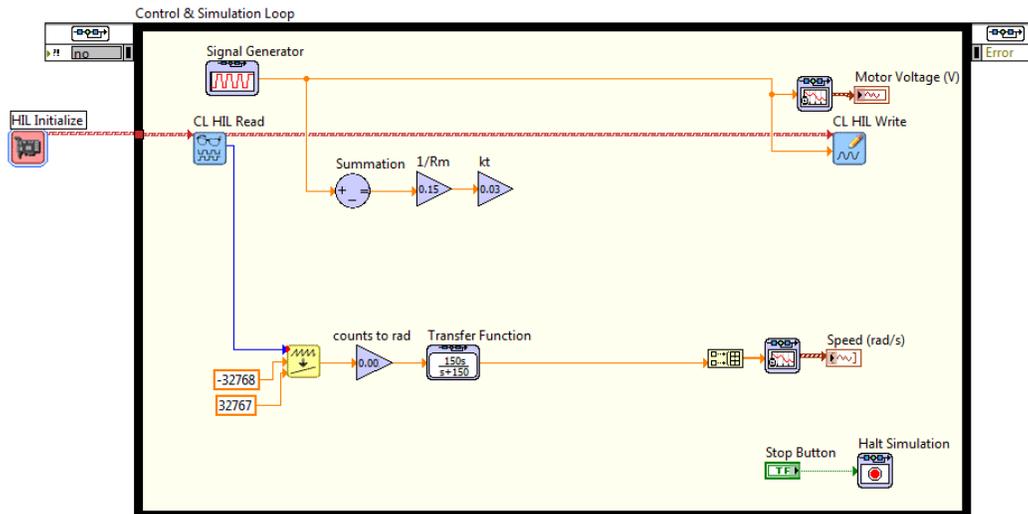
$$J = \frac{1}{2} m r^2. \quad (1.3)$$

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - спроектировать VI, показанный на рисунке 2.1, который будет подавать на двигатель сигнал прямоугольной формы напряжением 1-3 В и частотой 1.4 Гц и считывать скорость двигателя, определяемую с помощью энкодера. За основу можно взять VI, разработанные в лабораторных работах "Интеграция QUBE-Servo" и "Фильтрация".



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Применение ступенчатого напряжения и отображение измеренной и симулированной скорости QUBE-Servo (незавершенная блок-диаграмма)

Используя приведенные выше уравнения, создайте простую блок-диаграмму VI для моделирования системы. Вам понадобятся несколько блоков Gain, блок Subtract (вычитание) и блок Integrator (интегратор) (для перехода от ускорения к скорости). Частично реализованная блок-диаграмма показана на рисунке 2.1.

1. Ступица и нагрузочный диск прикреплены к валу двигателя QUBE-Servo. Используя параметры из таблицы 1.1, рассчитайте эквивалентный момент инерции, действующий на вал двигателя.
2. Разработайте модель QUBE-Servo с помощью описанных выше блоков палитры *Control Design & Simulation*. Приложите к отчету скриншот вашей модели.
3. Запустите VI с вашей моделью QUBE-Servo. Переходные характеристики должны быть похожи на показанные на рисунке 2.2. Приложите к отчету скриншот ваших графиков. Хорошо ли ваша модель представляет QUBE-Servo? Объясните.

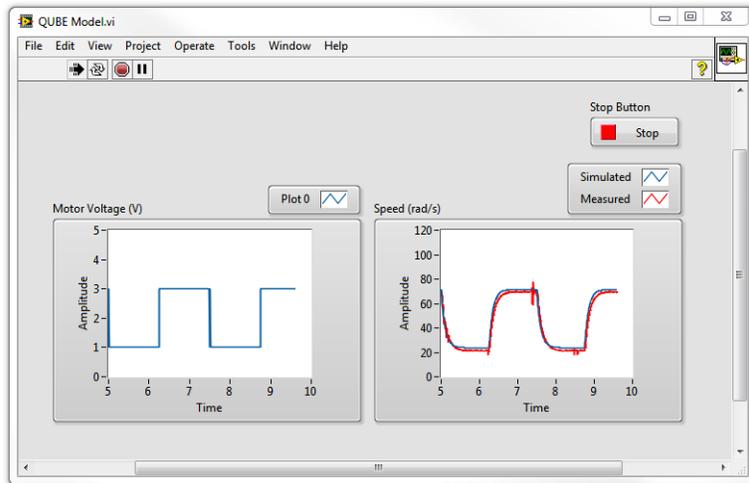


Рисунок 2.2: Измеренная и смоделированная характеристики QUBE-Servo

4. Остановите VI.
5. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

## 6. СИСТЕМЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА

### Рассматриваемые темы

- Системы второго порядка с недостаточным демпфированием.
- Коэффициент затухания и частота собственных колебаний.
- Время достижения пика и перерегулирование (в процентах) во временной области.

### Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".

# 1. Вводная информация

## 1.1. Переходная характеристика системы второго порядка

Стандартная передаточная функция системы второго порядка имеет вид

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (1.1)$$

где  $\omega_n$  - частота собственных колебаний, а  $\zeta$  - коэффициент затухания. Характеристики отклика зависят от значений параметров  $\omega_n$  и  $\zeta$ .

Рассмотрим систему второго порядка, представленную уравнением 1.1, на которую подается ступенчатый входной сигнал

$$R(s) = \frac{R_0}{s},$$

амплитудой ступеньки  $R_0 = 1.5$ . Отклик системы на этот входной сигнал показан на рисунке 1.1, где красным представлен выходной сигнал  $y(t)$ , а синим - ступенчатое входное воздействие  $r(t)$ .

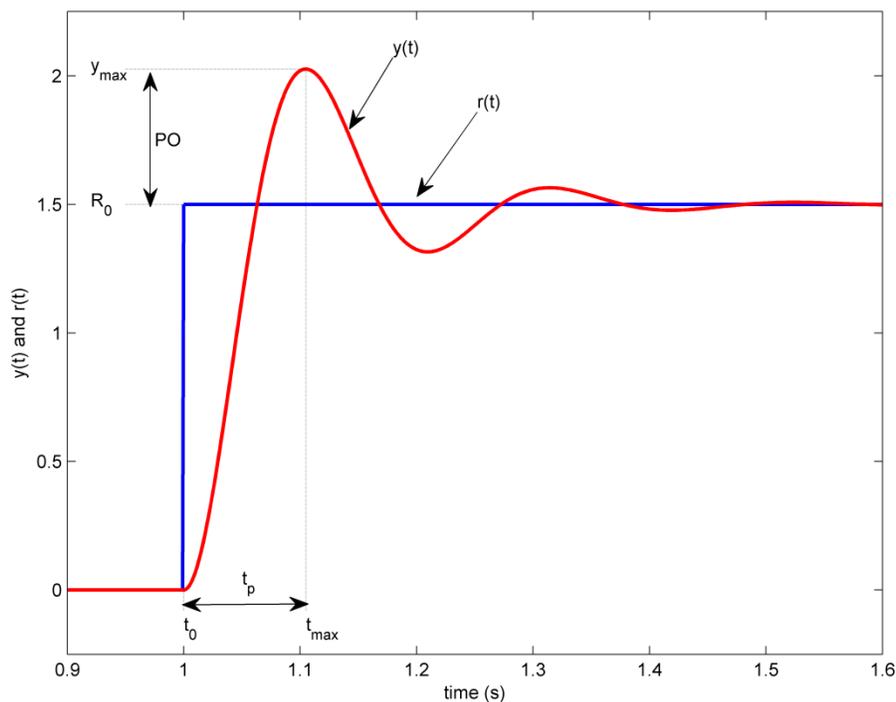


Рисунок 1.1: Стандартная переходная характеристика системы второго порядка

## 1.2. Время достижения пика и перерегулирование

Максимальное значение отклика обозначается  $y_{max}$  и достигается в момент времени  $t_{max}$ . Для

характеристики, показанной на рисунке 1.1, перерегулирование, в процентах, находится по формуле

$$PO = \frac{100 (y_{max} - R_0)}{R_0}. \quad (1.2)$$

Время, за которое выходной сигнал достигает максимального значения, начиная от момента начала ступеньки  $t_0$ , равно

$$t_p = t_{max} - t_0. \quad (1.3)$$

Это время называется временем достижения пика системы.

В системах второго порядка величина перерегулирования зависит только от коэффициента затухания и может быть рассчитана по формуле:

$$PO = 100e^{\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)}. \quad (1.4)$$

Время достижения пика зависит и от коэффициента затухания, и от частоты собственных колебаний системы, и может быть получено, как:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}. \quad (1.5)$$

В общем случае, коэффициент затухания влияет на форму выходного сигнала, а частота собственных колебаний - на его скорость.

### 1.3. Единичная обратная связь

Управляющий контур с единичной обратной связью, показанный на рисунке 1.2, будет использоваться для управления положением QUBE-Servo.

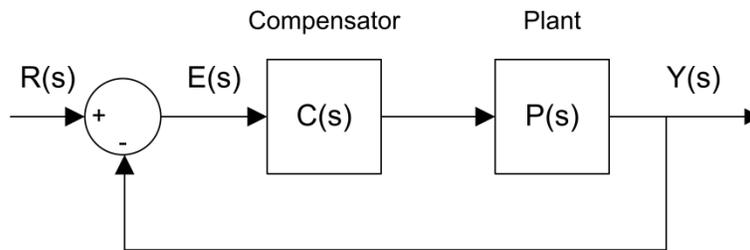


Рисунок 1.2: Контур с единичной обратной связью

Передаточная функция напряжение-положение QUBE-Servo с единичной обратной связью имеет вид:

$$P(s) = \frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)}.$$

где  $K = 23.0$  рад/(В·с) - коэффициент передачи модели в установившемся режиме,  $\tau = 0.13$  с - постоянная времени модели,  $\Theta_m(s) = \mathcal{L}[\theta_m(t)]$  - положение двигателя/диска, а  $V_m(s) = \mathcal{L}[v_m(t)]$  - напряжение, поданное на двигатель. При желании вы можете выполнить эксперимент и найти более точные значения параметров модели  $K$  и  $\tau$  для вашего конкретного двигателя (например, выполнив лабораторную работу "Моделирование ударных испытаний").

Контроллер обозначен  $C(s)$ . В этой лабораторной работе мы используем только единичную обратную связь, поэтому

$$C(s) = 1.$$

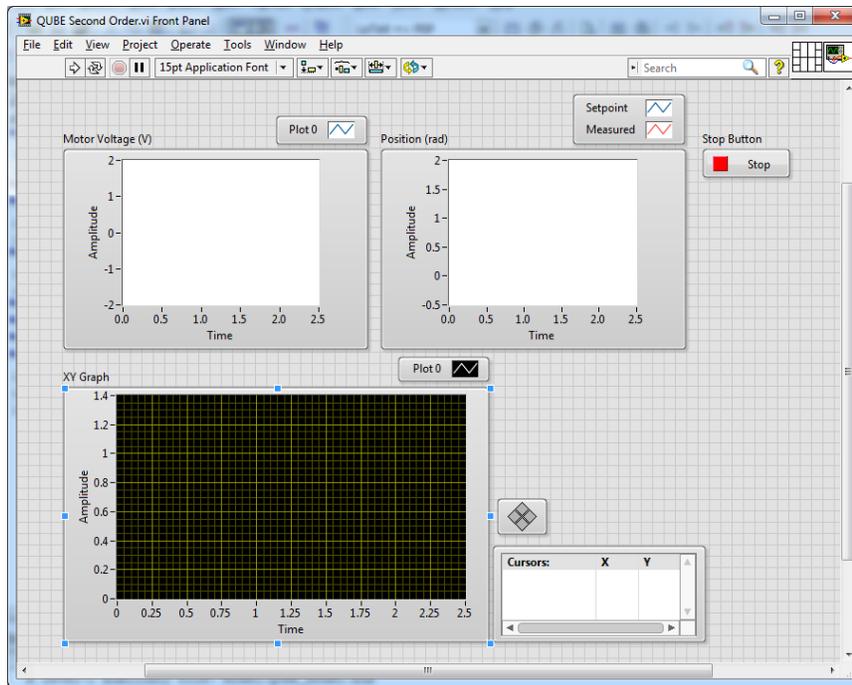
Передаточная функция замкнутой системы управления положением QUBE-Servo от входа задания уставки  $R(s) = \Theta_d(s)$  до выхода  $Y(s) = \Theta_m$  с использованием единичной обратной связи, показанной на рисунке 1.2, представляется выражением

$$\frac{\Theta_d(s)}{V_m(s)} = \frac{\frac{K}{\tau}}{s^2 + \frac{1}{\tau}s + \frac{K}{\tau}}. \quad (1.6)$$

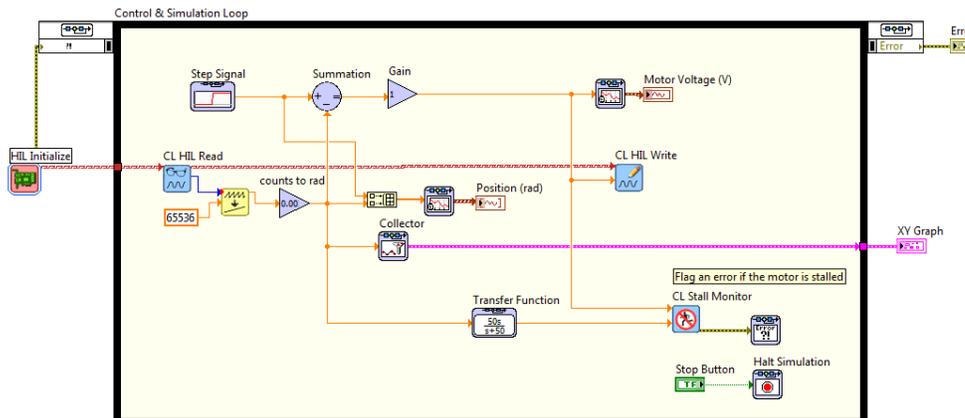
## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - взяв за основу VI, созданный в лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo", разработать VI, показанный на рисунке 2.1. Тем самым вы реализуете единичную обратную связь согласно уравнению 1.2. Опорное ступенчатое напряжение в 1 рад подается в течение 1 с, а регулятор работает в течение 2.5 с. Это требуемое положение или сигнал уставки.

Чтобы сформировать сигнал длительностью 2.5 с, задайте время завершения (*Final Time*) цикла Simulation Loop равным 2.5 (вместо *Inf*). Время достижения пика и величину перерегулирования можно определить из сохраненного сигнала отклика по методике, описанной в разделе "Вводная информация" этой лабораторной работы. Как показано на рисунке 2.1, переходная характеристика системы с единичной обратной связью "сохраняется" с помощью блока Collector из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Utilities* и отображается на графическом индикаторе XY Graph. Графические индикаторы LabVIEW™ типа graph, в отличие от типа chart, имеют курсоры, облегчающие измерения.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Управление положением QUBE-Servo в системе с единичной обратной связью

1. На основе уравнения 1.6 для системы QUBE-Servo с единичной обратной связью и приведенных выше параметров модели найдите частоту собственных колебаний и коэффициент затухания системы.
2. Какие значения времени достижения пика и перерегулирования (в процентах) можно ожидать при полученных значениях  $\omega_n$  и  $\zeta$ ?
3. Запустите VI. Графики должны выглядеть, как показанные на рисунке 2.2.

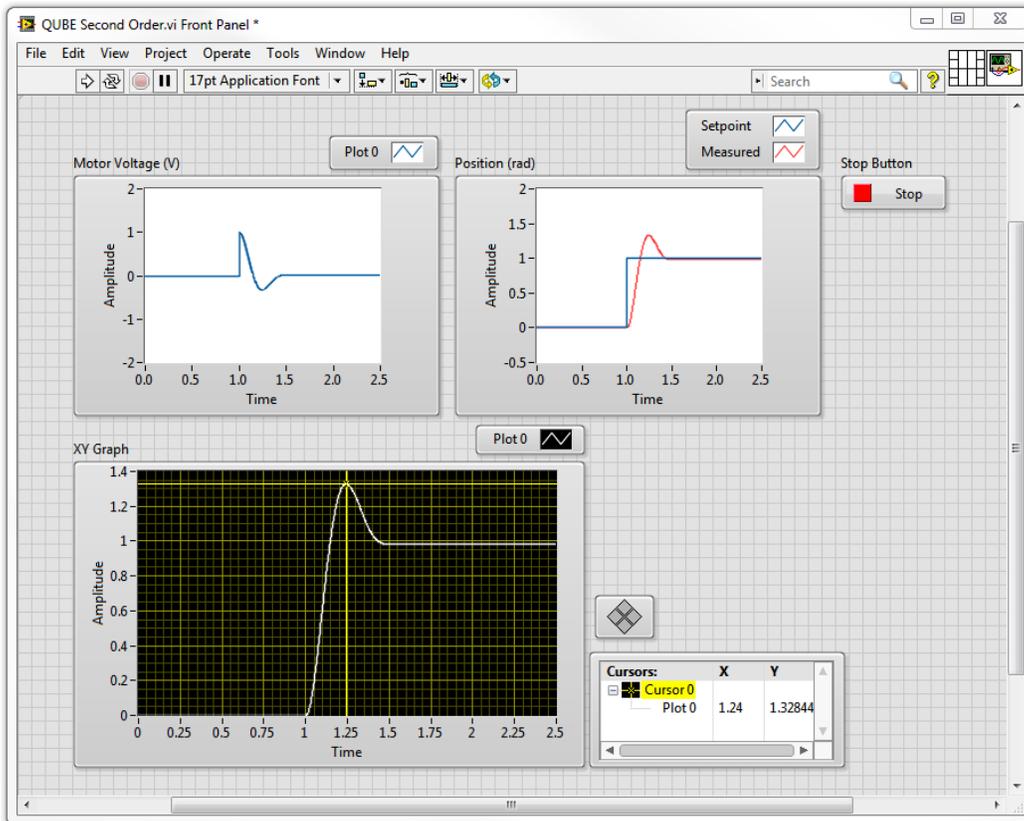


Рисунок 2.2: Переходная характеристика QUBE-Servo с единичной обратной связью

4. Добавьте в отчет переходную характеристику QUBE-Servo по положению – на одном графике покажите заданную уставку и результаты измерения положения, а также поданное на двигатель напряжение. Вы можете использовать функцию *Export | Export Simplified Image* для сохранения результатов измерения скорости нагруженного диска и напряжения на двигателе в файл рисунка, который можно вставить в отчет.
5. Измерьте по характеристике время достижения пика и процент перерегулирования и сравните с ожидаемыми результатами.  
**Подсказка:** Используйте палитру Cursor графического индикатора XY Graph для измерения координат точек на графике.
6. Остановите VI.
7. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.



# 7. ПД-регулирование

## Рассматриваемые темы

- Управление положением двигателя.
- Пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор.
- Разработка системы управления по заданным характеристикам.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".
- Выполнение лабораторной работы "Системы второго порядка".

# 1. Вводная информация

## 1.1. Модель двигателя

Передаточная функция напряжение-положение QUBE-Servo имеет вид:

$$P(s) = \frac{\Theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s(\tau s + 1)}, \quad (1.1)$$

где  $K = 23.2$  рад/(В·с) - коэффициент передачи модели в установившемся режиме,  $\tau = 0.13$  с - постоянная времени модели,  $\Theta_m(s) = \mathcal{L}[\theta_m(t)]$  - положение двигателя/диска, и  $V_m(s) = \mathcal{L}[v_m(t)]$  - напряжение, поданное на двигатель. При желании вы можете выполнить эксперимент и найти более точные значения параметров модели  $K$  и  $\tau$  для вашего конкретного двигателя (например, выполнив лабораторную работу "Моделирование ударных испытаний").

## 1.2. ПИД-регулирование

Пропорциональное, интегральное и дифференциальное регулирование можно математически выразить следующим образом:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Соответствующая блок-схема показана на рисунке 1.1. Управляющее воздействие является суммой трех термов: пропорционального (П), интегрального (И) и дифференциального (Д). Уравнение 1.2 регулятора можно также выразить передаточной функцией

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s. \quad (1.3)$$

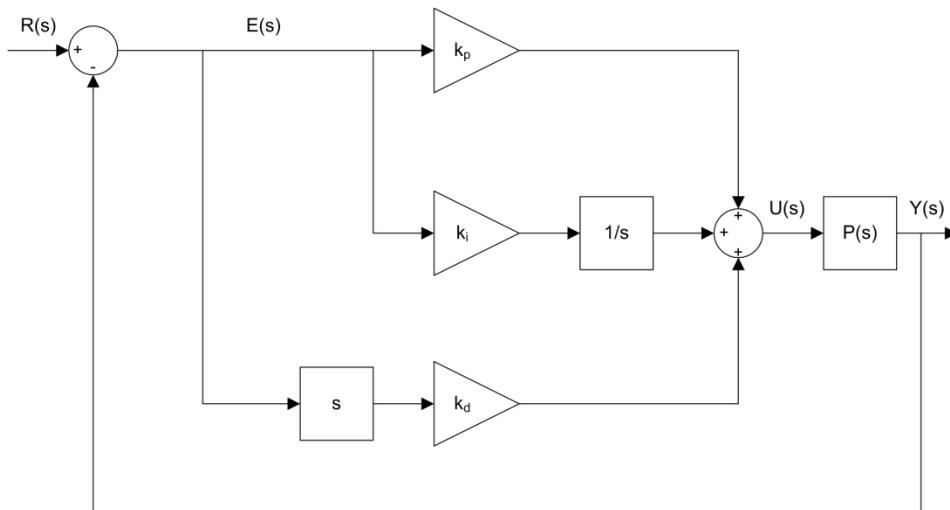


Рисунок 1.1: Блок-схема ПИД-регулятора

Функциональность ПИД-регулятора можно описать следующим образом: пропорциональное звено использует текущее значение ошибки, интегральное звено зависит от предыдущих значений ошибки, а дифференциальное звено отвечает за предсказание будущих ошибок.

В уравнениях 1.2 или 1.3 представлен идеальный ПИД-регулятор. Однако попытки реализовать подобный регулятор могут не дать хорошего отклика для реальной системы. Главная причина этого заключается в том, что результаты измерения сигналов всегда содержат шум измерения. Поэтому дифференцирование измеренных (зашумленных) сигналов приведет к большим флуктуациям, а это даст большие флуктуации управляющего сигнала.

### 1.3. Управление положением по скорости

Интегральное звено не будет применяться для управления положением двигателя. Будет использован вариант классического ПД-регулятора: схема управления по скорости показана на рисунке 1.2. В отличие от стандартного ПД-регулятора, по каналу обратной связи передается только отрицательная скорость (то есть, не скорость ошибки), а наряду с дифференцирующим термом будет использоваться ФНЧ для подавления шума измерения. Комбинация ФНЧ первого порядка и дифференциального звена означает, что вместо непосредственного взятия производной будет использован фильтр верхних частот,  $H(s)$ .

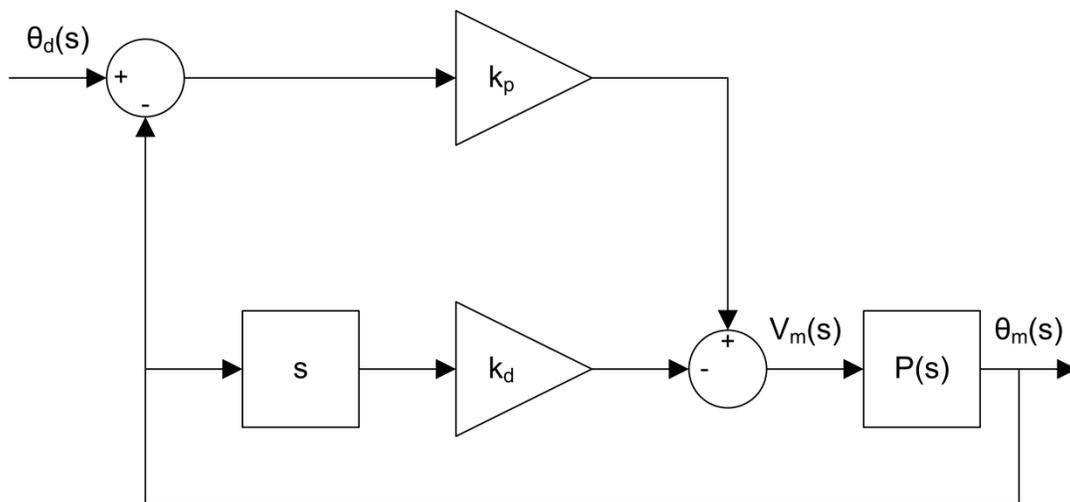


Рисунок 1.2: Блок-схема управления по скорости

Управление по скорости имеет следующую структуру:

$$u = k_p (r(t) - y(t)) - k_d \dot{y}(t), \quad (1.4)$$

где  $k_p$  - пропорциональный коэффициент,  $k_d$  - дифференциальный (по скорости) коэффициент,  $r = \theta_d(t)$  - уставка или заданный угол поворота двигателя/нагрузки,  $y = \theta_m(t)$  - результат измерения угла поворота нагруженного вала и  $u = V_m(t)$  - управляющий вход (поданное на двигатель напряжение).

Передаточная функция замкнутого контура QUBE-Servo описывается, как  $Y(s)/R(s) = \Theta_m(s)/\Theta_d(s)$ . Предположив, что все начальные условия нулевые, то есть  $\theta_m(0^-) = 0$  и  $\dot{\theta}_m(0^-) = 0$ , и, взяв преобразования Лапласа уравнения 1.4, получаем

$$U(s) = k_p(R(s) - Y(s)) - k_d s Y(s),$$

вставив которое в уравнение 1.1, найдем:

$$Y(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} (k_p(R(s) - Y(s)) - k_d s Y(s)).$$

Преобразовав относительно  $Y(s)/R(s)$ , получим выражение для замкнутой системы:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K k_p}{\tau s^2 + (1 + K k_d) s + K k_p}. \quad (1.5)$$

Это передаточная функция второго порядка.

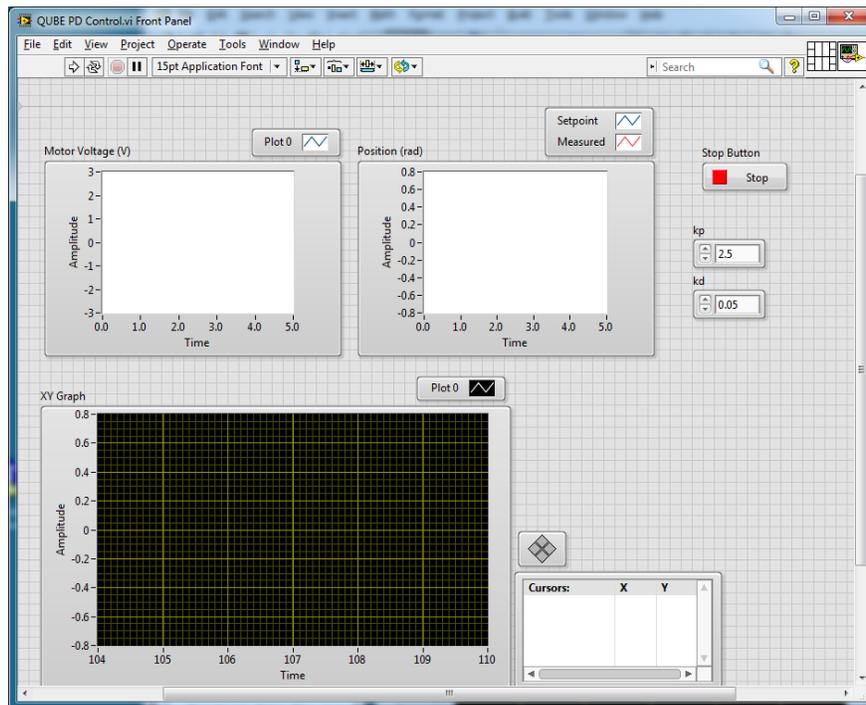
Вспомним, что стандартная передаточная функция второго порядка имеет вид

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (1.6)$$

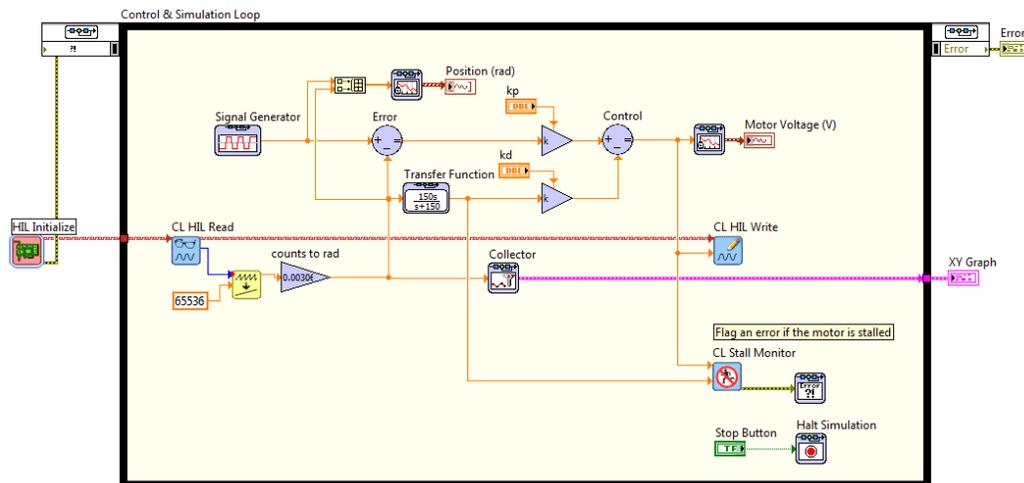
## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - взяв за основу VI, спроектированный в лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo", разработать VI, показанный на рисунке 2.1, Тем самым будет реализован описанный в разделе 1.3 контроллер с регулированием по скорости, в контроллере ФНЧ  $150/(s + 150)$  в дифференциальной ветви сводится к ФВЧ  $150s/(s+150)$ . Задайте такие настройки блока Signal Generator, чтобы команда на сервопривод (т.е., уставка по углу поворота) имела вид сигнала прямоугольной формы амплитудой 0.5 рад и частотой 0.4 Гц.

Время достижения пика и перерегулирования (в процентах) могут быть найдены из сохраненного отклика по методике, описанной в разделе 1. Как показано на рисунке 2.1, отклик ПД регулятора "сохраняется" с помощью блока Collector из палитры *Control Design & Simulation | Simulation | Utilities* и отображается на графическом индикаторе XY Graph. Графические индикаторы LabVIEW™ типа graph, в отличие от типа chart, имеют курсоры, облегчающие измерения.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Управление положением по скорости на QUBE-Servo

1. Сохраните и запустите VI. Отклик должен выглядеть, как показанный на рисунке 2.2.

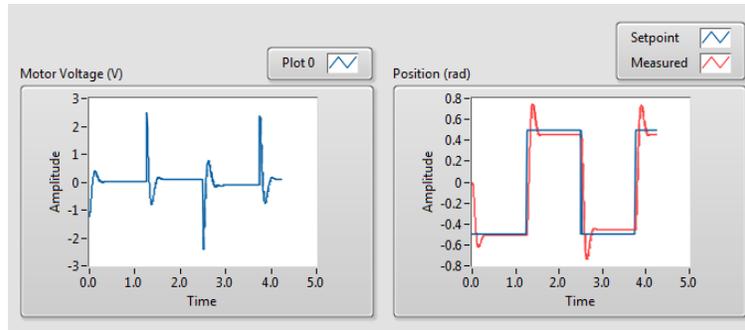


Рисунок 2.2: Управление положением по скорости на QUBE-Servo при  $k_p = 2.5$  и  $k_d = 0.05$ .

2. Задайте  $k_p = 2.5$  В/рад и  $k_d = 0$ . Сохраняйте дифференциальный коэффициент равным 0 и изменяйте  $k_p$  от 1 до 4. За что отвечает пропорциональный коэффициент при управлении положением двигателя?

**Подсказка:** Вам будет проще настроить коэффициент, если вы зададите свойство Increment числового элемента управления равным 0.1 или другому значению.

3. Задайте  $k_p = 2.5$  В/рад и изменяйте дифференциальный коэффициент  $k_d$  от 0 до 0.15 В/(рад/с). Какой эффект это окажет на сигнал положения?

**Подсказка:** Вам будет проще настроить коэффициент, если вы зададите свойство Increment числового элемента управления равным 0.01 или другому значению.

4. Остановите VI.
5. Найдите пропорциональный и дифференциальный коэффициенты, необходимые для передаточной функции замкнутой системы QUBE-Servo из уравнения 1.5. Ваши коэффициенты уравнений будут функцией от  $\omega_n$  и  $\zeta$ .
6. Чтобы время достижения пика равнялось 0.15 с, а процент перерегулирования 2.5%, частота собственных колебаний и коэффициент затухания должны составлять  $\omega_n = 32.3$  рад/с и  $\zeta = 0.76$ . Используя параметры модели QUBE-Servo  $K$  и  $\tau$ , приведенные в разделе 1.1 (или вычисленные вами в предыдущей лабораторной работе), рассчитайте коэффициенты регулятора, необходимые для удовлетворения данных требований.
7. Запустите регулятор с полученными коэффициентами. Добавьте в отчет графики характеристики положения, а также напряжения, поданного на двигатель. Вы можете использовать функцию *Export / Export Simplified Image* для сохранения результатов измерения скорости нагрузки/диска и напряжения на двигателе в файл рисунка, который можно вставить в отчет.

8. Измерьте перерегулирование (в процентах) и время достижения пика выходного сигнала. Совпадают ли они с заданными в пункте 6 значениями перерегулирования и времени достижения пика без насыщения двигателя, то есть без выхода напряжения за пределы  $\pm 10$  В?

**Подсказка:** Используйте палитру курсоров графического индикатора XY Graph для измерения координат точек на графике и уравнения из лабораторной работы №5.

9. Если ваша выходная характеристика не удовлетворяет заданным требованиям по перерегулированию и времени достижения пика, попробуйте настроить коэффициенты регулятора, пока не получите удовлетворительный результат. Приложите к отчету окончательную характеристику отклика, результаты измерения и опишите, как вы модифицировали регулятор, чтобы добиться этих результатов.

10. Остановите VI.

11. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт по адресу <http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более коллекций, и на воспроизведение работы, представленной в коллекциях, б) право создавать и воспроизводить адаптации при условии принятия необходимых шагов для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе коллекций, и г) право распространять и публично представлять адаптации. Вышеперечисленные права могут исполняться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях и ограничены следующими ограничениями: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным в первую очередь или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, и б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

# 8. МОМЕНТ ИНЕРЦИИ МАЯТНИКА

## Рассматриваемые темы

- Аналитическое и экспериментальное определение момента инерции.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo"
- Вращающийся маятник установлен на QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

На рисунке 1.1 показана силовая схема свободного тела маятника.

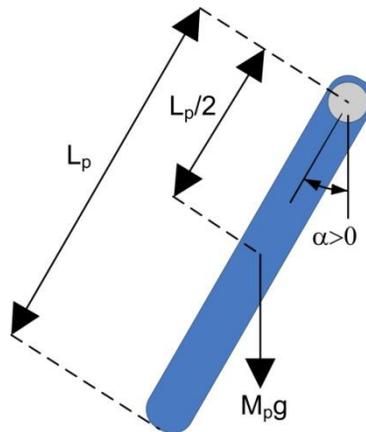


Рисунок 1.1: Силовая схема свободного тела маятника

Из схемы на рисунке 1.1 можно получить следующее нелинейное уравнение движения маятника:

$$J_p \ddot{\alpha}(t) = M_p g \frac{L_p}{2} \sin(\alpha(t)), \quad (1.1)$$

где  $J_p$  - момент инерции маятника относительно оси вращения,  $M_p$  - полная масса системы маятника, а  $L_p$  - длина маятника (от оси до края). Центр масс находится в точке  $L_p/2$ , как показано на рисунке 1.1.

Момент инерции маятника можно найти экспериментально. При условии, что маятник не приведен в движение, линеаризировав уравнение 1.1 и решив его, получаем

$$J_p = \frac{M_p g l_p}{(2\pi f)^2} \quad (1.2)$$

где  $f$  – результат измерения частоты колебаний маятника при условии, что плечо маятника остается жестким телом. Частота рассчитывается по формуле

$$f = \frac{n_{\text{сyc}}}{\Delta t} \quad (1.3)$$

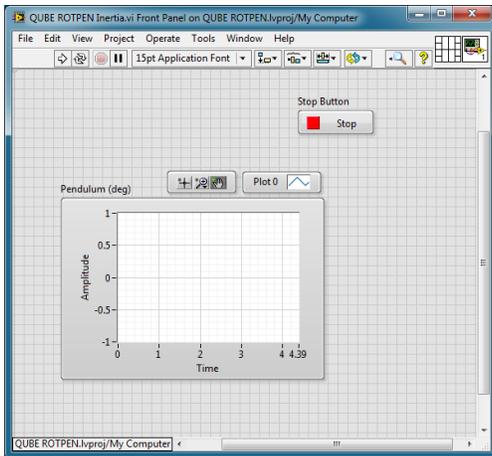
где  $n_{\text{сyc}}$  - количество периодов, а  $\Delta t$  - их продолжительность. Кроме того, из выражения для момента инерции можно рассчитать  $J_p$ :

$$J = \int r^2 dm \quad (1.4)$$

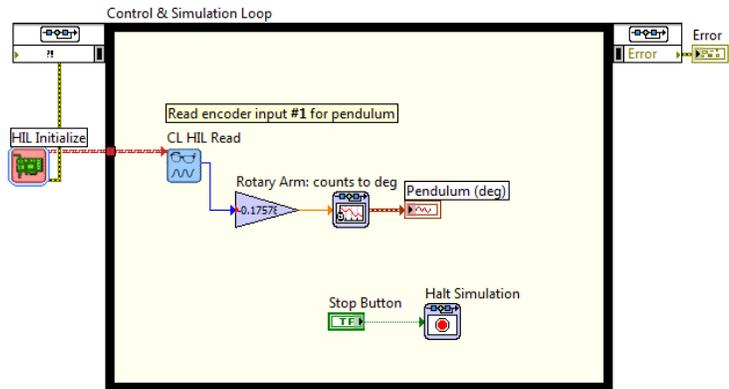
где  $r$  – перпендикулярное расстояние (плечо силы) между массой элемента  $dm$  и осью вращения.

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - создать модель, показанную на рисунке 2.1, которая измеряет угол маятника с помощью энкодера. За основу можно взять VI, разработанный в лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo".



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Отображение результатов измерения угла поворота маятника

1. Найдите момент инерции относительно оси маятника, используя схему свободного тела. Обязательно получите численное значение момента, используя параметры, приведенные в руководстве QUBE-Servo User Manual.

**Подсказка:** Для твердых тел с однородной плотностью разность масс можно выразить через разность длин.

2. Создайте VI по рисунку 2.1. Задайте коэффициент преобразования энкодера равным  $360/(512 * 4)$  для измерения угла поворота маятника в градусах.
3. Запустите VI. При работающем контроллере вручную выведите маятник из состояния равновесия, удерживая на месте вращающееся плечо. Ожидаемый вид графика отклика приведен на рисунке 2.2.

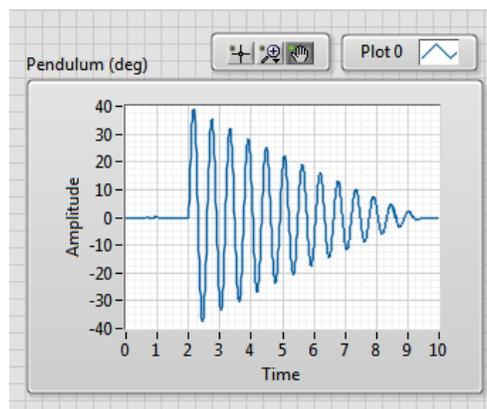


Рисунок 2.2: Свободные колебания маятника

4. Найдите частоту и момент инерции маятника на основе наблюдаемых результатов. При необходимости используйте палитру *Graph* для масштабирования изображения.

5. Сравните момент инерции, вычисленный аналитически в упражнении 1, с моментом инерции, найденным экспериментально. Велико ли несоответствие между ними?
6. Остановите VI.
7. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc



# 9. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАЯТНИКА

## Рассматриваемые темы

- Работа с вращающимся маятником системы Quanser QUBE-Servo.
- Настройка коэффициентов датчика и актюатора для приведения в соответствие с параметрами модели.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Вращающийся маятник прикреплен к QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

Вращающийся маятник, известный также как маятник Фуруты - классическая система, часто используемая для обучения моделированию и управлению в физике и машиностроении. На рисунке 1.1 показана схема свободного тела вращающегося маятника.

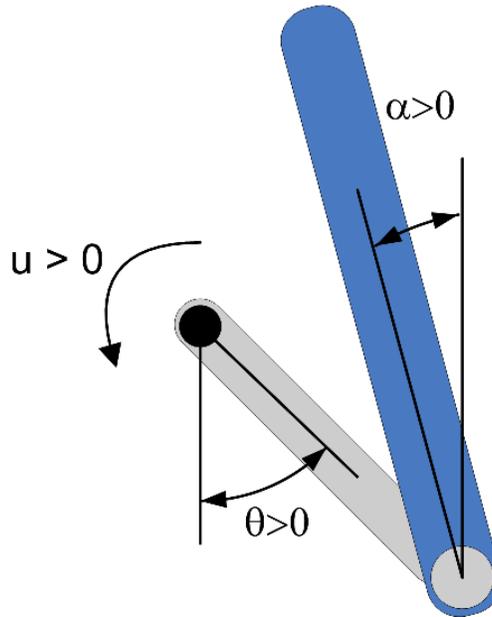


Рисунок 1.1: Схема свободного тела вращающегося маятника

Вращающееся плечо, прикрепленное к оси двигателя, обозначено переменной  $\theta$ , а угол маятника, прикрепленного к концу вращающегося плеча, обозначен переменной  $\alpha$ . Обратите внимание на следующие условия:

- Угол  $\alpha$  определяется как *угол поворота инверсного маятника*, то есть угол относительно верхнего вертикального положения, где  $\alpha = 0$  означает, что маятник расположен строго вертикально. Математически это можно выразить как

$$\alpha = \alpha_{full} \bmod 2\pi - \pi. \quad (1.1)$$

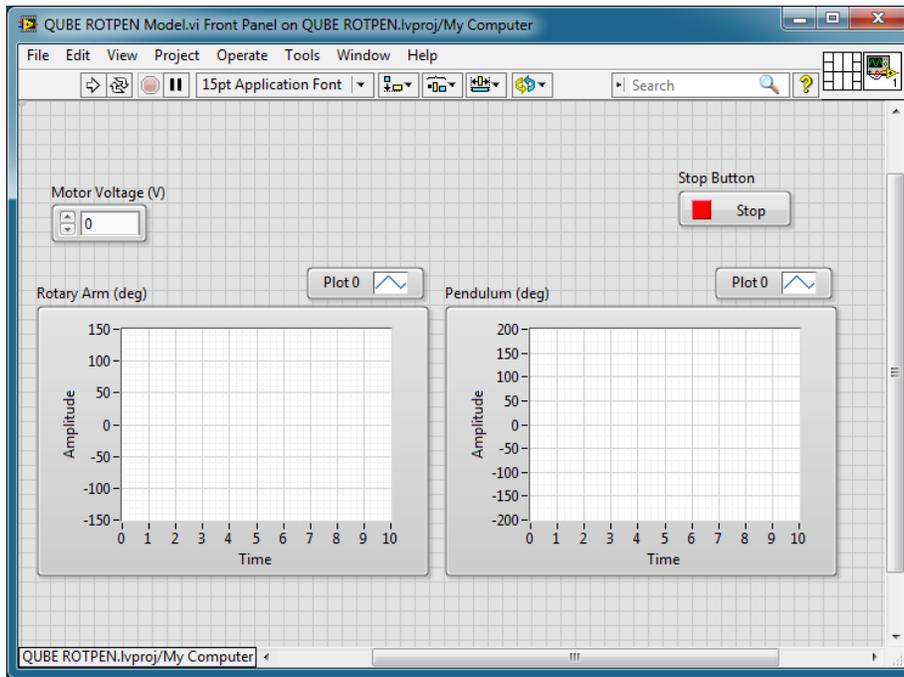
где  $\alpha_{full}$  – результат измерения угла маятника, полученный с помощью энкодера, причем текущее значение измеряемого угла равно нулю, когда маятник находится в нижнем положении.

- Оба угла считаются положительными при вращении против часовой стрелки.
- Если на двигатель подается положительное напряжение, вращающееся плечо движется в положительном направлении (против часовой стрелки).

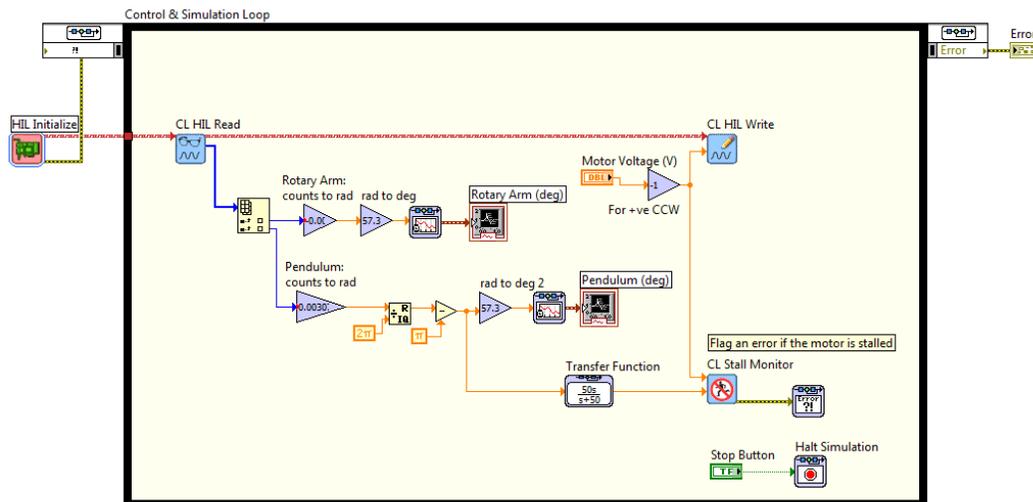
Цель заключается в том, чтобы разработать модель системы, удовлетворяющие этим условиям. В лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo" вы ознакомились с двигателем постоянного тока и энкодерами системы QUBE-Servo. Угол поворота маятника измеряется также с помощью энкодера.

## 2. Задание на лабораторную работу

В этой лабораторной работе мы создадим LabVIEW™ VI для управления двигателем постоянного тока и измерения углов вращающегося плеча и маятника - как показано на рисунке 2.1.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: VI для управления двигателем и считывания углов системы QUBE-Servo ROTPEN

1. Взяв за основу VI, разработанный в лабораторной работе "Интеграция QUBE-Servo", сделайте следующее:

- Настройте блок HIL Read Encoder на считывание из каналов 0 и 1. Угол поворота маятника измеряется в канале #1.

- Задайте коэффициенты преобразования энкодеров в каждом канале так, чтобы угол считывался в радианах, а не в градусах.
- Выведите результаты измерения углов на графические индикаторы, но отобразите их в градусах (чтобы было интуитивно понятнее). Вы можете сделать это, добавив блоки Gain для преобразования радианов в градусы.
- Подключите числовой элемент управления к каналу *Analog Output* для изменения напряжения на двигателе.

2. Запустите VI.

3. Поверните вращающееся плечо и маятник против часовой стрелки и исследуйте отклик по графическим индикаторам. Примеры характеристик показаны на рисунке 2.2. Соответствуют ли результаты измерения углов соглашениям по модели, приведенным в разделе "Вводная информация" этой лабораторной работы?

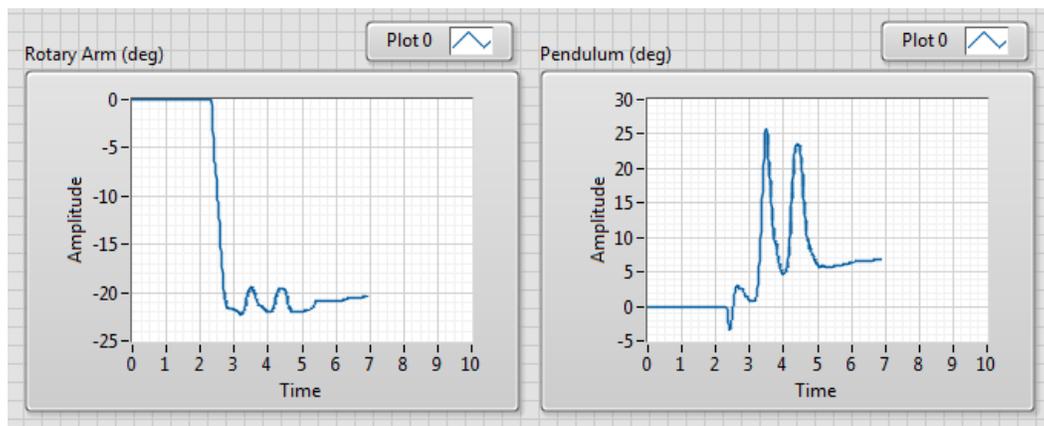


Рисунок 2.2: Результаты измерения углов вращающегося плеча и маятника

4. Подайте на двигатель небольшое напряжение (0.5 В) Соответствует ли ваш VI принятым соглашениям по модели?
5. Модифицируйте VI так, чтобы результаты измерения углов и приложенное напряжение соответствовали принятым для модели соглашениям. Кратко опишите все внесенные изменения.
6. Добавьте блоки деления по модулю и смещения, как показано на рисунке 2.3 для измерения угла поворота инверсного маятника, определенного уравнением 1.1.

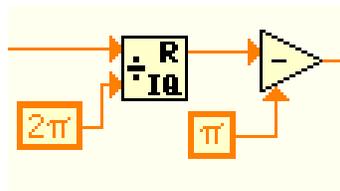


Рисунок 2.3: Блоки деления по модулю и смещения LabVIEW

7. Убедитесь, что до запуска контроллера маятник находится в нижнем положении равновесия. Запустите VI.
8. Переведите маятник в верхнее вертикальное положение и убедитесь, что угол измеряется правильно и соответствует схеме свободного тела (рисунок 1.1). Получите характеристику маятника, поднятого в верхнее положение. Объясните, для чего нужны функции деления по модулю и вычисления смещения.

9. Остановите VI.
10. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

# 10. УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСОМ

## Рассматриваемые темы

- Логика разрешения управления.
- ПИД-регулирование баланса.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".
- Выполнение лабораторной работы "ПД-регулирование".
- Выполнение лабораторной работы "Моделирование вращающегося маятника".
- Вращающийся маятник прикреплен к QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

Балансирование - распространенная задача управления. В этом эксперименте мы определим принципы управления, с помощью которых будем балансировать маятник в верхнем положении, поддерживая требуемое положение плеча. При балансировании системы угол маятника  $\alpha$  мал, и балансированием можно управлять простым ПД-регулятором, показанным на рисунке 1.1. Если, кроме того, нам необходимо сохранять требуемое положение плеча, необходимо также ввести обратную связь по положению плеча. Тогда закон регулирования можно описать как

$$u = k_{p,\theta}(\theta_r - \theta) - k_{p,\alpha}\alpha - k_{d,\theta}\dot{\theta} - k_{d,\alpha}\dot{\alpha} \quad (1.1)$$

где  $k_{p,\theta}$  - пропорциональный коэффициент угла плеча,  $k_{p,\alpha}$  - пропорциональный коэффициент угла маятника,  $k_{d,\theta}$  - дифференциальный коэффициент угла плеча,  $k_{d,\alpha}$  - дифференциальный коэффициент угла маятника. Требуемый угол руки обозначен  $\theta_r$ , а опорный угол маятника равен нулю (то есть маятник находится в верхнем вертикальном положении).

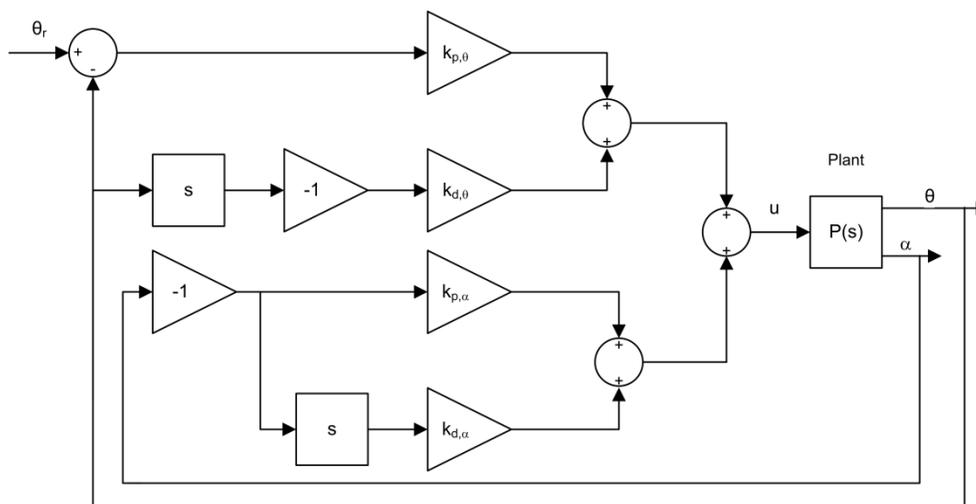


Рисунок 1.1: Блок-схема ПД-регулятора для балансирования вращающегося маятника

Существует множество способов определения параметров регулятора. Один из методов рассматривается в лабораторной работе "Оптимальный линейно-квадратичный регулятор". Но сначала поведение системы будет исследоваться с параметрами по умолчанию.

Вспомним, что угол маятника  $\alpha$  равен нулю, когда маятник находится в верхнем вертикальном положении, что выражается математически формулой  $\alpha = \alpha_{full} \bmod 2\pi - \pi$ , как описано в лабораторной работе "Моделирование вращающегося маятника".

$$\alpha = \alpha_{full} \bmod 2\pi - \pi$$

Управление балансом будет включаться, когда угол отклонения маятника находится в пределах

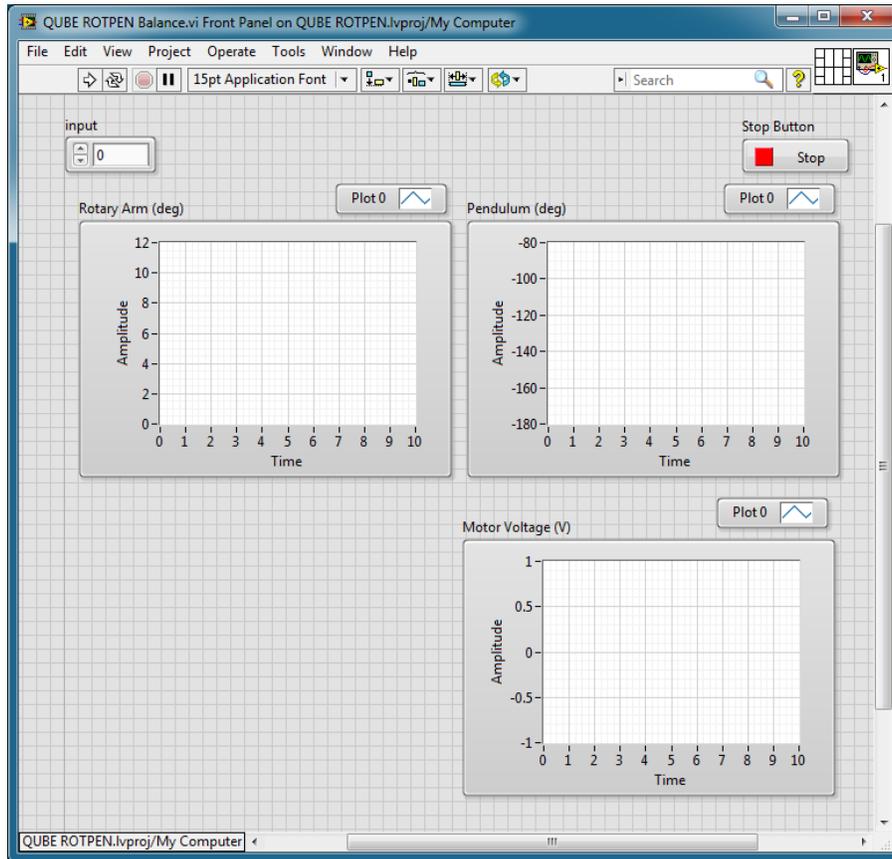
$$|\alpha| \leq 10 \text{ градусов.}$$

Учитывая, что изначально маятник находится в нижнем вертикальном положении, его необходимо вручную переместить в верхнее вертикальное положение. Как только маятник будет в пределах  $\pm 10$ , включается регулятор баланса. Он остается в режиме баланса, пока угол маятника не превысит  $\pm 10$  градусов.

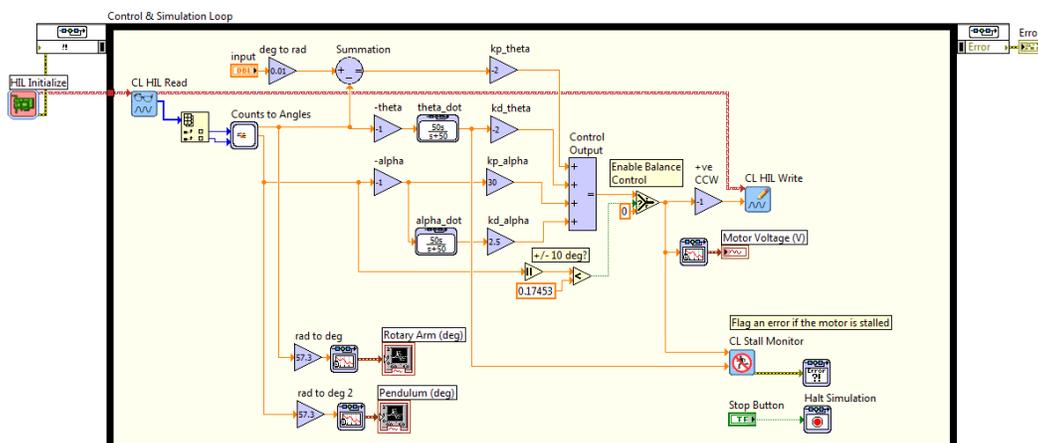
При желании вы можете добавить в вашу программу алгоритм для автоматического подъема маятника. За подробностями обратитесь к лабораторной работе "Управление колебаниями".

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - спроектировать VI, показанный на рисунке 2.1, которой будет балансировать вращающийся маятник QUBE-Servo с помощью ПД-регулятора, описанного в разделе "Вводная информация" данной лабораторной работы. За основу можно взять VI, разработанный в лабораторной работе "Моделирование вращающегося маятника".



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: VI для запуска ПД-регулятора баланса

- Взяв за основу VI, разработанный в лабораторной работе "Моделирование вращающегося маятника", создайте контроллер, показанный на рисунке 2.1:
  - Подсистема *Counts to Angles* содержит те же блоки, что использовались в лабораторной работе "Моделирование вращающегося маятника" для преобразования отсчетов энкодера в радианы. Убедитесь, что используете инвертированный угол маятника.
  - Чтобы найти скорости вращающегося плеча и маятника, добавьте ФВЧ с характеристикой  $50s/(s + 50)$ , как в лабораторной работе "Фильтрация".
  - Добавьте блоки Sum и Gain, необходимые для реализации ПД-регулирования в соответствии с уравнением 1.1.
  - Регулятор должен быть активирован, только когда угол маятника составляет  $\pm 10$  градусов относительно верхнего вертикального положения (или  $\pm 0.175$  рад). Чтобы это реализовать, используйте блоки Absolute Value (абсолютное значение), Constant Comparison (сравнение с константой) и Selector (селектор).
- Задайте следующие коэффициенты ПД-регулятора:  $k_{p,\theta} = -2$ ,  $k_{p,\alpha} = 30$ ,  $k_{d,\theta} = -2$ , and  $k_{d,\alpha} = 2.5$ .
- Убедитесь, что до запуска регулятора маятник находится в нижнем положении равновесия. Запустите VI.
- Вручную поворачивайте маятник в верхнее вертикальное положение до тех пор, пока не включится регулятор. На графиках должно отобразиться что-то похожее на рисунок 2.2. Добавьте в отчет характеристику вращающегося плеча, маятника и напряжения на двигателе.

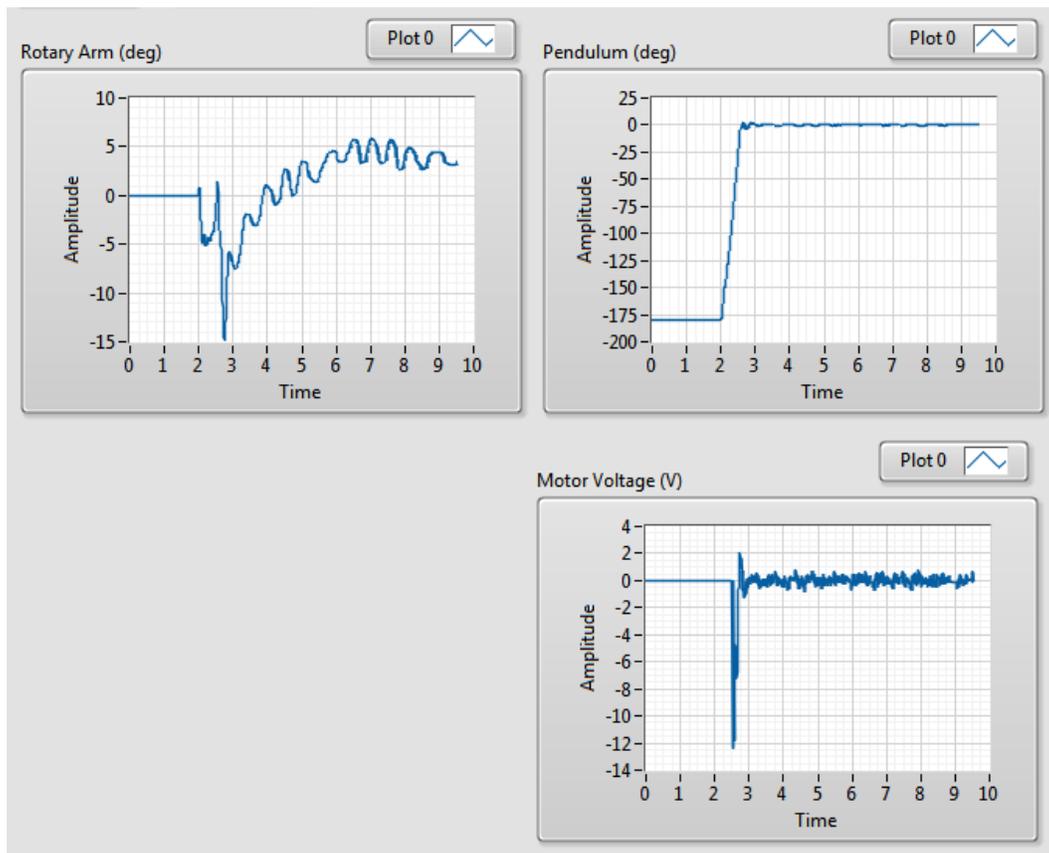


Рисунок 2.2: Характеристика вращающегося маятника QUBE-Servo

5. Опишите характеристики графиков *Rotary Arm (deg)* и *Pendulum Angle (deg)* в режиме управления балансом маятника.
6. Найдите блок Summation перед `kp_theta`. Измените значение константы, подключенной к положительному входу сумматора. **Не задавайте слишком большое значение, для начала не более  $\pm 45$ .** Наблюдайте характеристику на графическом индикаторе *Arm Angle (deg)*. Какая переменная представляет это в режиме управления балансом?
7. Остановите VI.
8. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
[info@quanser.com](mailto:info@quanser.com)  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

# 11. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

## Рассматриваемые темы

- Моделирование инверсного маятника.
- Введение в модели пространства состояний.
- Проверка модели.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Интеграция QUBE-Servo".
- Выполнение лабораторной работы "Основные принципы моделирования".
- Выполнение лабораторной работы "Моделирование вращающегося маятника".
- Вращающийся маятник прикреплен к QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

## 1.1 Модель маятника

Модель вращающегося маятника показана на рисунке 1.1. Ось вращающегося плеча прикреплена к системе QUBE-Servo и приводится ею в действие. Плечо имеет длину  $L_r$ , момент инерции  $J_r$ , а ее угол  $\theta$  увеличивается при вращении против часовой стрелки. Сервопривод (и, соответственно, плечо маятника) должны вращаться против часовой стрелки при подаче положительного управляющего напряжения, то есть  $V_m > 0$ .

Звено маятника прикреплено к концу вращающегося плеча. Длина звена  $L_p$ , а центр масс находится в точке  $L_p/2$ . Момент инерции относительно центра масс равен  $J_p$ . Угол инверсного маятника  $\alpha$  равен нулю, когда маятник свисает сверху вниз, и увеличивается при вращении против часовой стрелки.

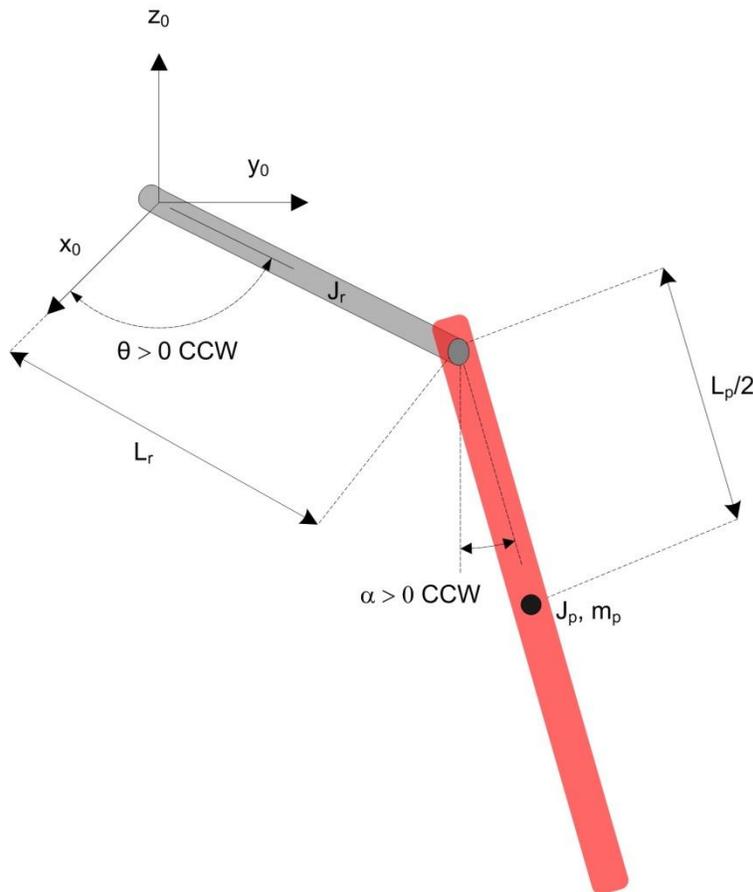


Рисунок 1.1: Модель инверсного вращающегося маятника.

Уравнения движения системы маятника были разработаны по методу Эйлера-Лагранжа. Этот системный метод часто используется для моделирования сложных систем, например, роботов-манипуляторов с несколькими суставами (звеньями). Сначала получают полную кинетическую и потенциальную энергию системы, а затем находят Лагранжиан. Далее вычисляется набор производных для получения уравнений движения. Полный вывод уравнения движения системы маятника приведен в обзоре *Rotary Pendulum Modeling Summary* и руководстве Maple.

Выведенные нелинейные уравнения движения имеют следующий вид:

$$\left(m_p L_r^2 + \frac{1}{4} m_p L_p^2 - \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos(\alpha)^2 + J_r\right) \ddot{\theta} - \left(\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha)\right) \ddot{\alpha} + \left(\frac{1}{2} m_p L_p^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha)\right) \dot{\theta} \dot{\alpha} + \left(\frac{1}{2} m_p L_p L_r \sin(\alpha)\right) \dot{\alpha}^2 = \tau - D_r \dot{\theta} \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{2} m_p L_p L_r \cos(\alpha) \ddot{\theta} + \left(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2\right) \ddot{\alpha} - \frac{1}{4} m_p L_p^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_p L_p g \sin(\alpha) = -D_p \dot{\alpha}. \quad (1.2)$$

где приложенный к основанию плеча вращающий момент, создаваемый серводвигателем, описывается уравнением:

$$\tau = \frac{k_m(V_m - k_m \dot{\theta})}{R_m} \quad (1.3)$$

Если линеаризовать нелинейные уравнения движения в районе рабочей точки, то получим линейные уравнения движения инверсного маятника:

$$\left(m_p L_r^2 + J_r\right) \ddot{\theta} - \frac{1}{2} m_p L_p L_r \ddot{\alpha} = \tau - D_r \dot{\theta}. \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{2} m_p L_p L_r \ddot{\theta} + \left(J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2\right) \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} m_p L_p g \alpha = -D_p \dot{\alpha}. \quad (1.5)$$

Решив относительно ускорений, получаем

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_T} \left( - \left( J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \right) D_r \dot{\theta} + \frac{1}{2} m_p L_p L_r D_p \dot{\alpha} + \frac{1}{4} m_p^2 L_p^2 L_r g \alpha + \left( J_p + \frac{1}{4} m_p L_p^2 \right) \tau \right). \quad (1.6)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_T} \left( \frac{1}{2} m_p L_p L_r D_r \dot{\theta} - (J_r + m_p L_r^2) D_p \dot{\alpha} - \frac{1}{2} m_p L_p g (J_r + m_p L_r^2) \alpha - \frac{1}{2} m_p L_p L_r \tau \right). \quad (1.7)$$

где

$$J_T = J_p m_p L_r^2 + J_r J_p + \frac{1}{4} J_r m_p L_p^2. \quad (1.8)$$

### 1.1.1. Линейная модель в пространстве состояний

Ниже приведены линейные уравнения в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.9)$$

$$y = Cx + Du \quad (1.10)$$

где  $x$  - состояние,  $u$  - управляющее воздействие,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  - матрицы пространства состояний. Для системы вращающегося маятника состояния и выход определяются как

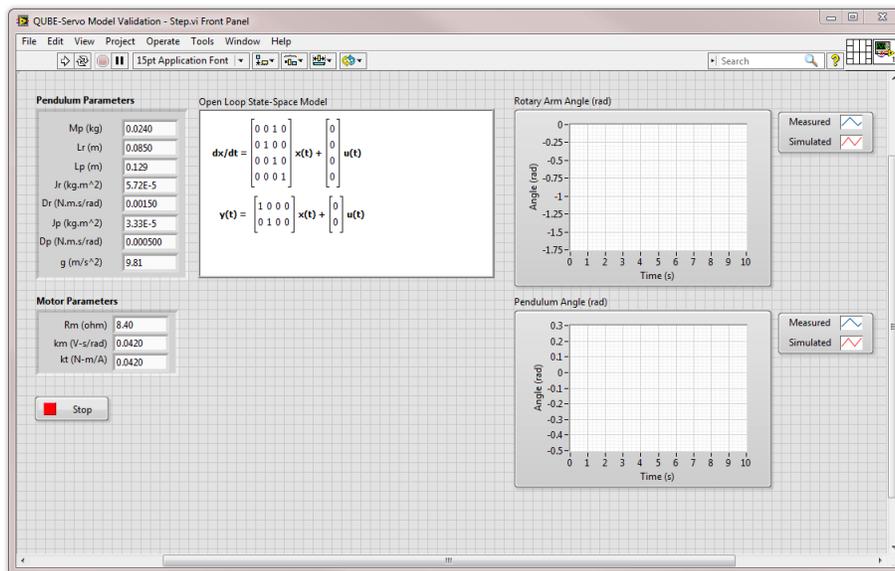
$$x^T = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}] \quad (1.11)$$

$$y^T = [x_1 \ x_2]. \quad (1.12)$$

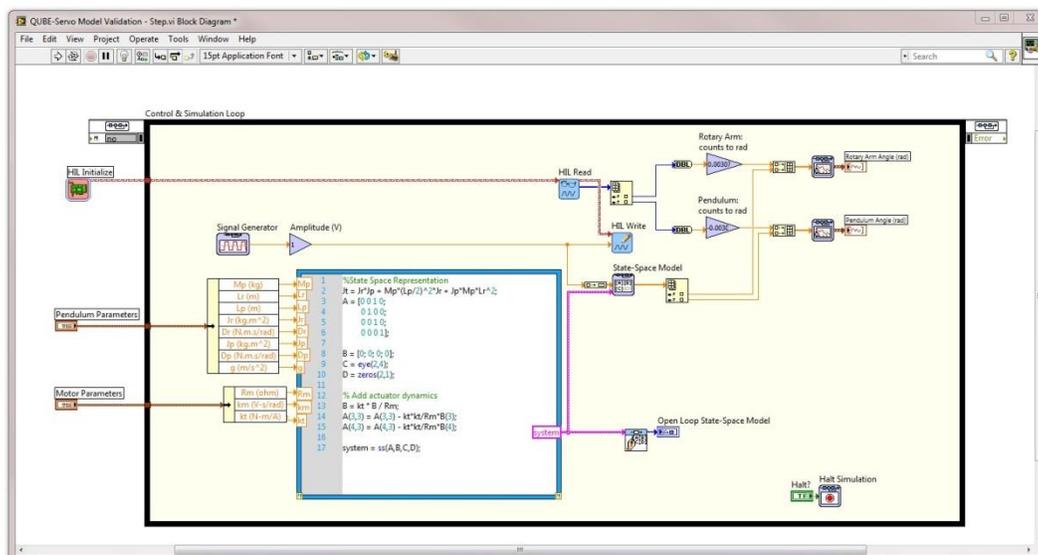
## 2. Задание на лабораторную работу

### 2.1 Модель маятника в пространстве состояний

В модуле *Control Design and Simulation LabVIEW™* доступны несколько VI для создания линейных моделей в пространстве состояний. Взяв за основу VI, разработанный в лабораторной работе "Моделирование вращающегося маятника", спроектируйте VI, показанный на рисунке 2.1, который подает сигнал прямоугольной формы напряжением 0-1 В и частотой 1 Гц на систему маятника, и модель в пространстве состояний.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.1: Формирование ступенчатого напряжения и отображение измеренной и смоделированной характеристик маятника.

Существует несколько способов создания модели в пространстве состояний в **LabVIEW™**. В методе, проиллюстрированном рисунком 2.1, для создания модели используются средства модуля *MathScript RT*, результаты выполнения которых далее передается на *State-Space VI* для симуляции.

**Примечание:** Не забудьте включить в вашу модель динамику актюатора, как показано на рисунке 2.1.

1. Используя характеристики датчиков системы маятника найдите матрицы  $C$  и  $D$  из уравнения 1.10.
2. Используя уравнения 1.6 и 1.7, а также определенное уравнением 1.11 состояние, выведите линейную модель системы маятника в пространстве состояний.
3. Подключите линейную модель в пространстве состояний к VI для проверки модели. Используя *Draw State-Space Equation VI*, показанный на рисунке 2.1, убедитесь, что вы ввели правильные матрицы.
4. Задайте коэффициент вязкого затухания вращающегося плеча  $D_r$  равным 0.0015 Н-м-с/рад, а коэффициент затухания маятника  $D_p$  равным 0.0005 Н-м-с/рад. Эти параметры были найдены экспериментально при получении переходной характеристики и достаточно точно отражают вязкость затухания системы из-за эффекта трения.
5. Запустите VI. Переходные характеристики должны выглядеть подобно показанным на рисунке 2.2. Приложите к отчету скриншоты ваших графиков. Хорошо ли ваша модель представляет реальный маятник? Если нет, объясните, почему.

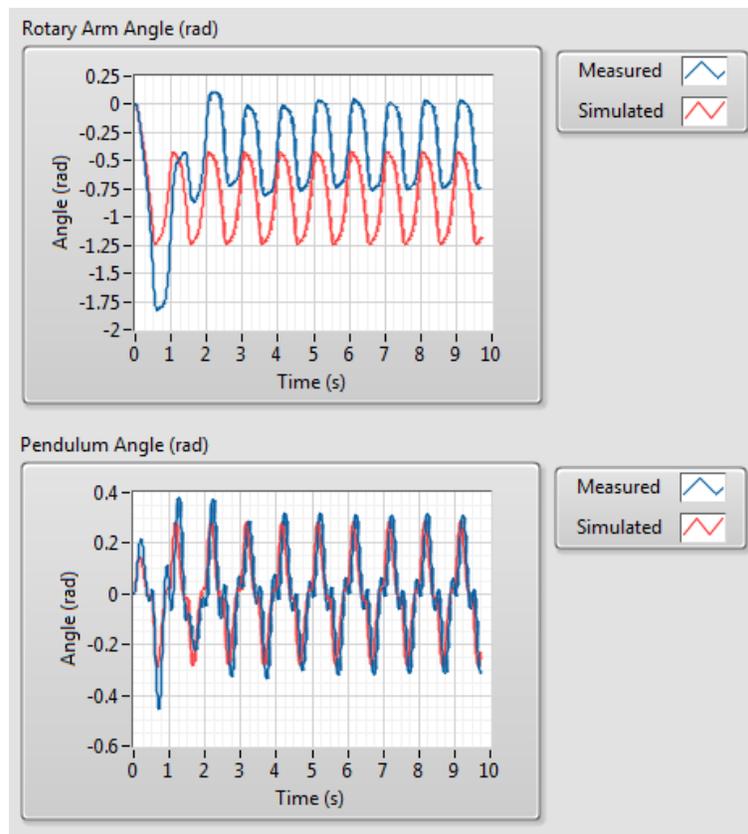


Рисунок 2.2: Переходная характеристика системы маятника

6. Вязкое затухание инверсного маятника может немного изменяться от системы к системе. Если ваша модель не точно представляет вашу систему, попробуйте модифицировать коэффициенты затухания  $D_r$  и  $D_p$  для получения более точной модели.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com Телефон:  
1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

# 12. УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМОМ

## Рассматриваемые темы

- Управление энергией.
- Нелинейное управление.
- Логика переключения управления.

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".
- Выполнение лабораторной работы "Управление балансом".
- Вращающийся маятник прикреплен к QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

## 1.1 Управление энергией

Теоретически, если угол плеча маятника остается постоянным, и маятнику придано начальное возмущение, он будет колебаться с постоянной амплитудой. Идея управления энергией основана на законе сохранения энергии в идеальных системах: сумма кинетической и потенциальной энергии остается постоянной. Однако на практике из-за трения колебания будут затухать, и полная энергия системы не будет постоянной. Можно найти потери энергии, используя ускорение оси вращения, что, в свою очередь, может помочь построить контроллер для управления колебаниями маятника.

Динамику маятника можно выразить относительно ускорения  $u$  оси

$$J_p \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} M_p g L_p \sin \alpha = \frac{1}{2} M_p g u \cos \alpha. \quad (1.1)$$

Здесь  $u$  - линейное ускорение маятника.

Потенциальная энергия маятника равна

$$E_p = \frac{1}{2} M_p g L_p (1 - \cos \alpha),$$

а кинетическая энергия

$$E_k = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2.$$

Угол поворота маятника  $\alpha$  и его длина показаны на диаграмме сил, действующих на свободное тело (рисунок 1.1).

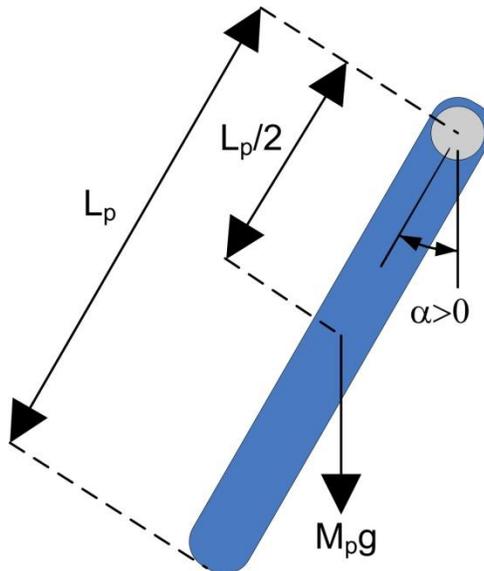


Рисунок 1.1: Диаграмма сил свободного тела маятника

Потенциальная энергия равна нулю, если маятник находится в покое при  $\alpha = 0$  и равна  $M_p g L_p$ , когда маятник в верхнем вертикальном положении при  $\alpha = \pm\pi$ . Сумма потенциальной и кинетической энергий маятника составляет

$$E = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} M_p g L_p (1 - \cos \alpha). \quad (1.2)$$

Продифференцировав уравнение 1.2, получаем

$$\dot{E} = \dot{\alpha} \left( J_p \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} M_p g L_p \sin \alpha \right). \quad (1.3)$$

Вспомнив уравнение (1.1) и поменяв местами термы, получим

$$J_p \ddot{\alpha} = -M_p g l_p \sin \alpha + M_p u l_p \cos \alpha$$

и, наконец,

$$\dot{E} = M_p u l_p \dot{\alpha} \cos \alpha.$$

Поскольку ускорение оси вращения пропорционально току, управляющему плечом маятника, и, следовательно, приложенному напряжению, энергией маятника можно управлять, используя принцип пропорционального регулирования

$$u = (E_r - E) \dot{\alpha} \cos \alpha. \quad (1.4)$$

Если задать опорную энергию равной потенциальной энергии маятника ( $E_r = E_p$ ), то согласно закону управления звено поднимется в верхнее вертикальное положение. Обратите внимание, что закон управления нелинеен, поскольку коэффициент пропорциональности зависит от косинуса угла поворота маятника  $\alpha$ . Обратите также внимание, что управляющее воздействие изменяет знак при изменении знака  $\alpha$ , когда угол равен  $\pm 90$  градусов.

Для быстрого изменения энергии требуется большая амплитуда управляющего сигнала. В результате реализован следующий контроллер подъема маятника:

$$u = \text{sat}_{u_{max}} (\mu (E_r - E) \text{sign}(\dot{\alpha} \cos \alpha)) \quad (1.5)$$

где  $\mu$  - настраиваемый коэффициент усиления управляющего сигнала, а функция  $\text{sat}_{u_{max}}$  ограничивает управляющий сигнал (вводит в режим насыщения) при максимальном ускорении оси вращения маятника,  $u_{max}$ . Выражение  $\text{sign}(\dot{\alpha} \cos \alpha)$  используется для более быстрого переключения управления.

## 1.2 Гибридное управление подъемом

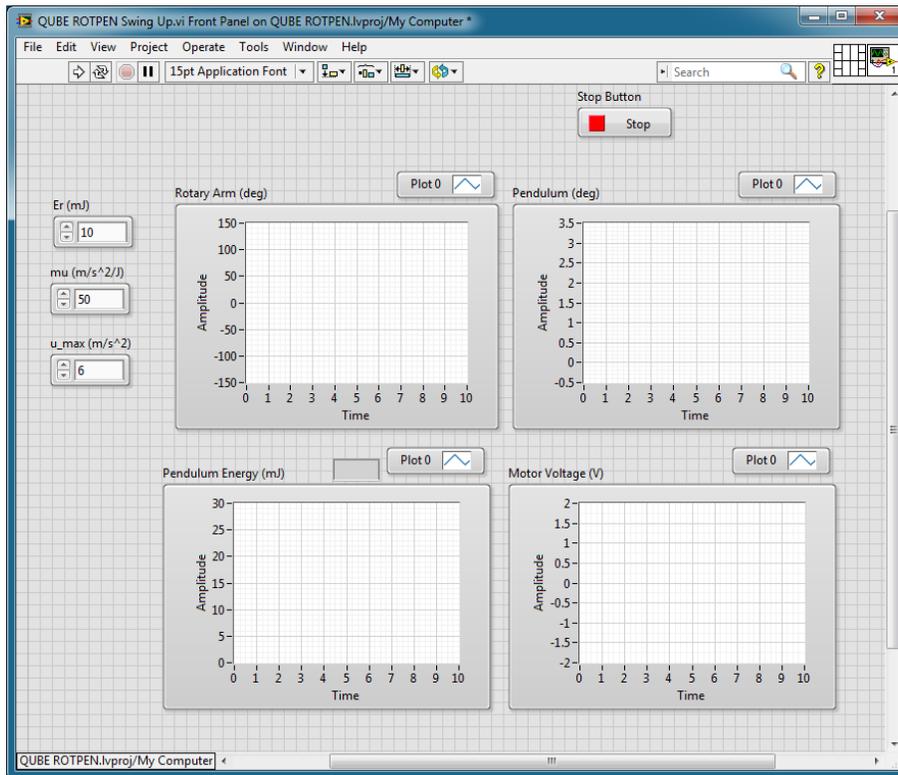
Управление подъемом заданием подаваемой энергии по уравнению 1.4 (или 1.5) может быть объединено с законом управления балансом из лабораторной работы "Управление балансом" для получения закона, который решает двойную задачу – подымает маятник вверх и балансирует его.

Как описано в лабораторной работе "Управление балансом", управление балансом включается, когда угол отклонения маятника составляет  $\pm 20$  градусов. Когда управление балансом выключено, работает управление подъемом маятника в верхнее положение. Тогда математически закон переключения можно записать в виде:

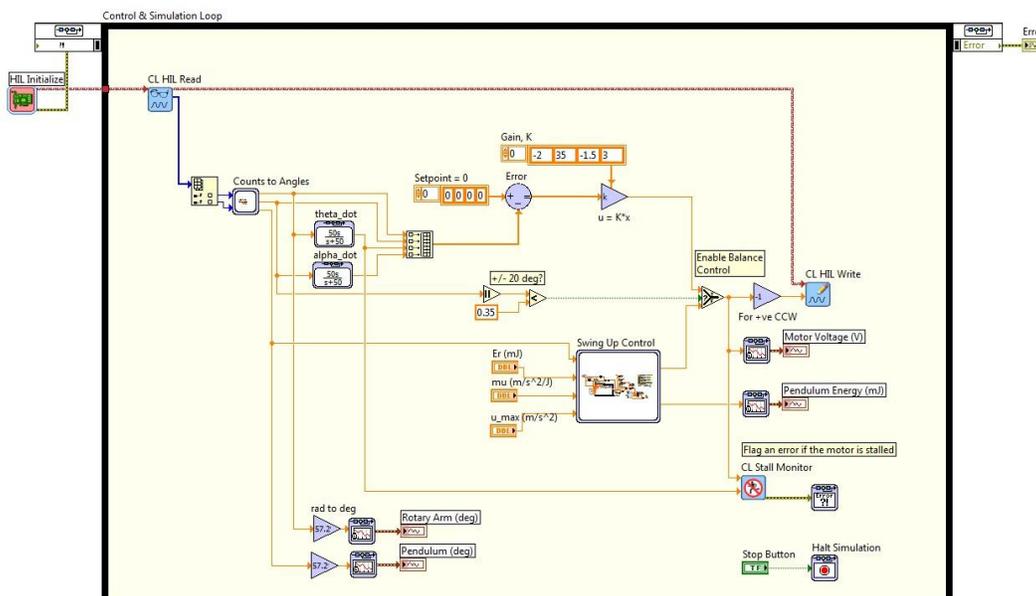
$$u = \begin{cases} u_{bal} & \text{если } |\alpha| - \pi \leq 20 \text{ градусов,} \\ u_{swing\_up} & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

## 2. Задание на лабораторную работу

Цель работы - создать VI, показанный на рисунке 2.1, который подымает и балансирует вращающийся маятник QUBE-Servo. Подсистема "Управление колебаниями" реализует управление энергией, описанное в разделе "Вводная информация" этой лабораторной работы.



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

## 2.1 Управление энергией

1. Откройте *QUBE-Servo ROTPEN Swing Up.vi* VI.
2. Для выключения управления подъемом задайте  $m$  равным 0.
3. Запустите VI.
4. Вручную отклоняйте маятник на разные углы и наблюдайте угол и энергию маятника на графических индикаторах *Pendulum (deg)* и *Pendulum Energy (mJ)*.
5. Как изменяется энергия, если перемещать маятник в разные положения? Запишите значение энергии, при которой маятник балансирует в верхнем вертикальном положении. Соответствует ли это значение уравнениям, приведенным в разделе "Вводная информация" данной лабораторной работы?
6. Щелкните по кнопке *Stop* для возвращения маятника в исходное положение (нижнее вертикальное).
7. Задайте следующие значения параметров управления подъемом маятника (в блоках *Constant* и *Gain*, подключенных к подсистеме *Swing-Up Control*):
  - $m = 50 \text{ м/с}^2/\text{Дж}$
  - $E_g = 10.0 \text{ мДж}$
  - $u_{\text{max}} = 6 \text{ м/с}^2$
8. Если маятник не движется, осторожно подтолкните его рукой из нижнего вертикального положения.
9. Изменяйте опорную энергию  $E_g$  в пределах от 10 до 20 мДж. При каждом изменении наблюдайте угол и энергию на графических индикаторах *Pendulum (deg)* и *Pendulum Energy (mJ)*, а также управляющий сигнал на графическом индикаторе *Motor Voltage (V)*. Приложите к отчету характеристики, показывающие, как изменение опорной энергии влияет на систему.
10. Задайте  $E_g$  равной 20 мДж и изменяйте коэффициент управления подъемом  $m$  между 20 и 60  $\text{м/с}^2/\text{Дж}$ . Опишите, как это влияет на эффективность управления энергией.
11. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

## 2.2 Гибридное управление колебаниями

1. Откройте *QUBE-Servo ROTPEN Swing Up.vi* VI.
2. Для выключения управления колебаниями задайте  $m$  равным 0.
3. Запустите VI.
4. Задайте следующие значения параметров управления колебаниями:
  - $m = 20 \text{ м/с}^2/\text{Дж}$
  - $u_{\text{max}} = 6 \text{ м/с}^2$
5. Основываясь на наблюдениях, выполненных в лабораторной работе "Управление энергией", ответьте, какое значение опорной энергии следует задать?
6. Убедитесь, что маятник находится в нижнем вертикальном положении в состоянии покоя, и кабель энкодера не мешает его движению.
7. Запустите VI.
8. Маятник должен начать раскачиваться. Если это не происходит, слегка качните его рукой. **Щелкните**

**по кнопке Stop, если колебания маятника станут нестабильными.**

9. Постепенно увеличивайте коэффициент управления подъемом  $\mu$  (обозначенный Slider Gain  $\mu$ ), пока маятник не достигнет верхнего вертикального положения. Сохраните характеристику подъема и запишите требуемый коэффициент управления подъемом. Покажите угол отклонения маятника, энергию маятника и напряжение на двигателе.
10. Остановите VI.
11. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada info@quanser.com  
Телефон: 1-905-940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.



# 13. ОПТИМАЛЬНОЕ LQR УПРАВЛЕНИЕ

## Рассматриваемые темы

- Введение в модели в пространстве состояний.
- Управление с обратной связью по состоянию.
- Оптимизация по методу линейно-квадратичного регулятора (LQR).

## Предварительные требования

- Выполнение лабораторной работы "Фильтрация".
- Выполнение лабораторной работы "Управление балансом".
- Вращающийся маятник прикреплен к QUBE-Servo.

# 1. Вводная информация

Теория линейно-квадратичного регулятора (LQR) - технология, идеально подходящая для нахождения параметров регулятора баланса из лабораторной работы "Управление балансом". Учитывая, что уравнение движения системы может быть описано в форме

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

где  $A$  и  $B$  - матрицы состояния и входа системы, соответственно, алгоритм LQR применяет закон управления  $u$  по критерию эффективности или минимизации функции стоимости

$$J = \int_0^{\infty} (x_{ref} - x(t))^T Q (x_{ref} - x(t)) + u(t)^T R u(t) dt \quad (1.1)$$

Матрица  $Q$  определяет штраф по отклонению переменной состояния от заданного значения, а матрица  $R$  - штраф по управляющему воздействию. При увеличении элемента  $Q$  функция стоимости увеличивает штраф, связанный с любыми отклонениями переменной состояния от заданной уставки, и результирующий коэффициент усиления становится больше. При увеличении матрицы  $R$  большие штрафы налагаются на более жесткое управляющее воздействие, и коэффициенты усиления уменьшаются.

В нашем случае вектор состояния  $x$  имеет вид

$$x = [\theta \quad \alpha \quad \dot{\theta} \quad \dot{\alpha}]^T. \quad (1.2)$$

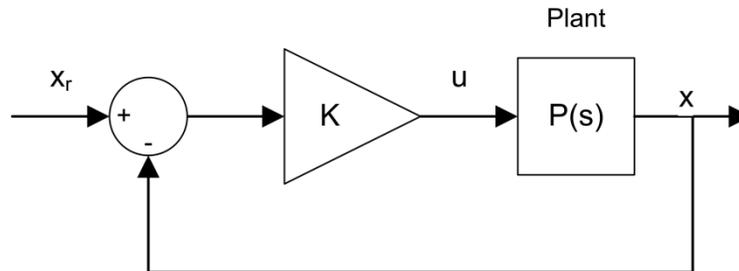


Рисунок 1.1: Блок-схема управления балансом вращающегося маятника с обратной связью по состоянию

Поскольку у нас всего одна переменная управления, то  $R$  – скаляр. Опорный сигнал  $x_{ref}$  равен  $[\theta_r \ 0 \ 0 \ 0]$ , и стратегия управления используется для минимизации функции стоимости  $J$

$$u = K(x_{ref} - x) = k_{p,\theta}(\theta_r - \theta) - k_{p,\alpha}\alpha - k_{d,\theta}\dot{\theta} - k_{d,\alpha}\dot{\alpha}. \quad (1.3)$$

Закон управления с обратной связью по состоянию иллюстрирует рисунок 1.1. Это эквивалент ПД-регулятора, описанного в лабораторной работе "Управление балансом".

## 2. Задание на лабораторную работу

### 2.1 Расчет линейно-квадратичного регулятора

Теория проектирования LQR-регулятора реализуется средствами модуля *Control Design & Simulation LabVIEW™*. Имея на входе модель системы в пространстве состояний (с матрицами  $A$  и  $B$ ) и матрицы весов  $Q$  и  $R$ , функция LQR комплекта *Control Design* автоматически минимизирует функцию стоимости 1.1 и рассчитывает оптимальный коэффициент усиления обратной связи.

В этом эксперименте модель в пространстве состояний уже есть. В лабораторной работе будет исследовано влияние изменения матрицы весов  $Q$  на функцию стоимости  $J$ , при матрице  $R$ , равной 1.

1. Запустите *QUBE-Servo ROTPEN State-Space Model.vi*, показанный на рисунке 2.1. Он загружает матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  модели вращающегося маятника QUBE-Servo в пространстве состояний и сохраняет их в файле *qube\_rotpen*.

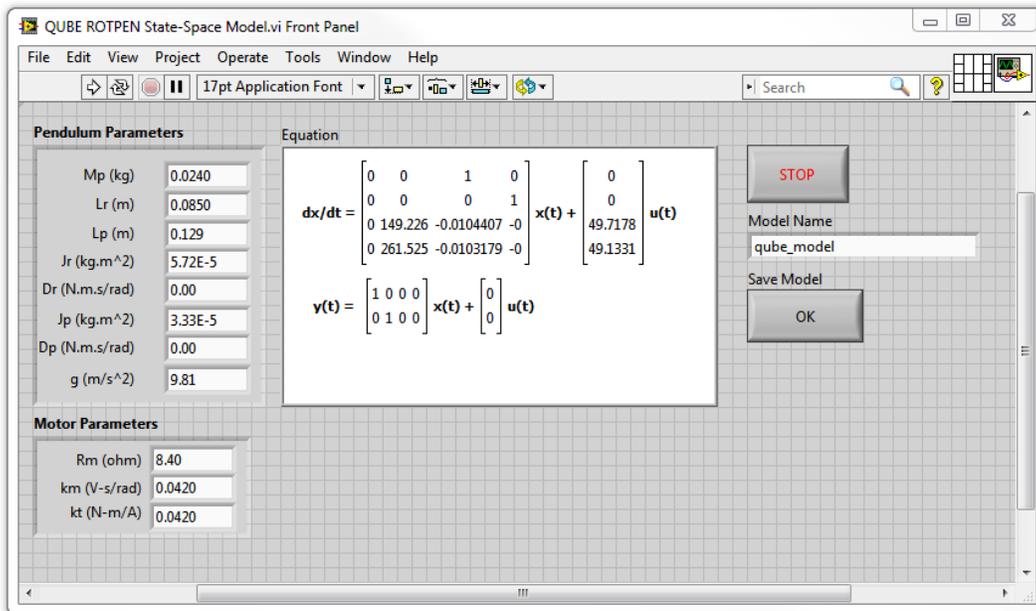


Рисунок 2.1: VI для генерации модели QUBE-Servo ROTPEN в пространстве состояний

2. Разработайте VI, подобный показанному на рисунке 2.2, для нахождения полюсов разомкнутой системы. Используйте *Read Model from File* для загрузки только что сохраненного файла модели (как правило, он сохраняется в папке *Rotpen Model*). Что вы заметили в расположении полюсов разомкнутой системы? Как это влияет на систему?

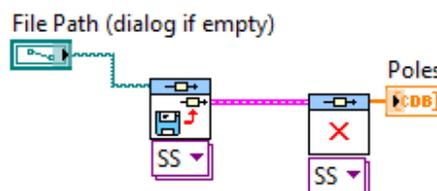
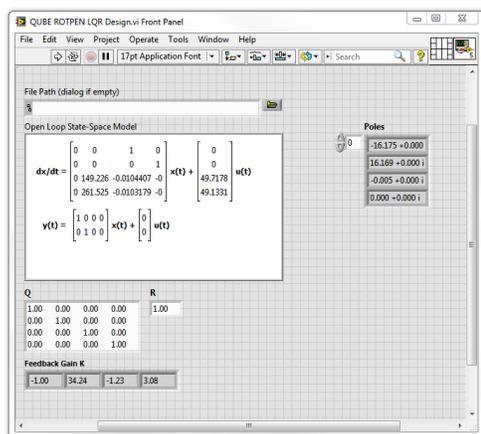


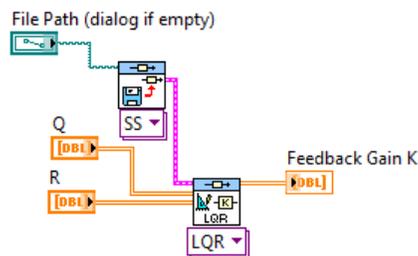
Рисунок 2.2: Нахождение полюсов загруженной модели в пространстве состояний

3. Используйте Read Model from File VI и Linear Quadratic Regular VI, показанные на рисунке 2.3, для генерации коэффициента  $K$ . Сгенерируйте  $K$  на основе следующих матриц весов:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad R = 1$$



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.3: Генерация коэффициента усиления LQR с помощью загруженной модели в пространстве состояний

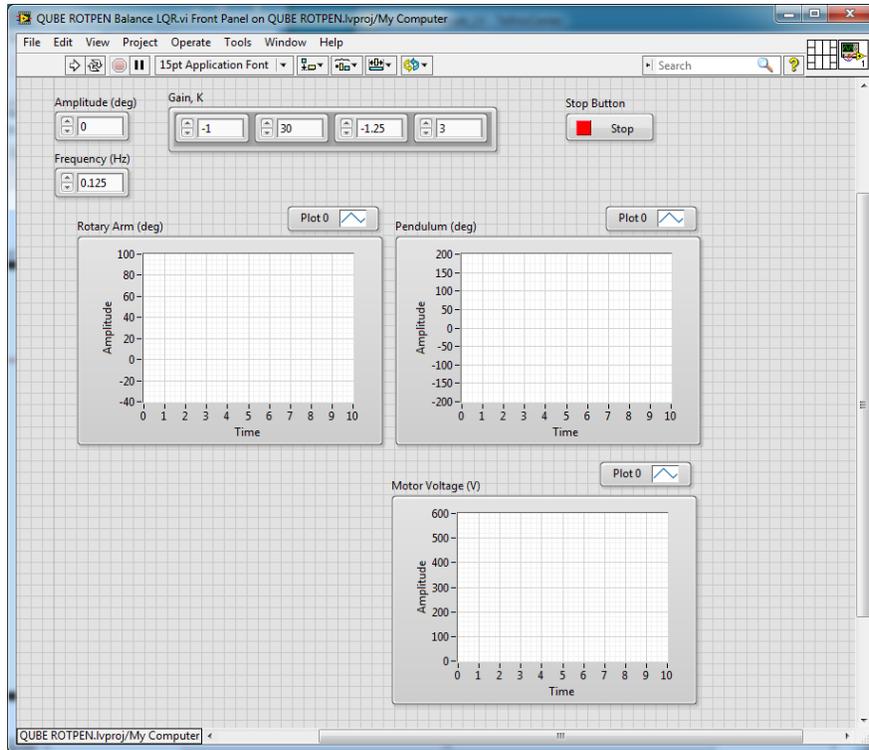
4. Измените матрицу весов LQR на приведенную ниже и сгенерируйте новый коэффициент  $K$ :

$$Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad R = 1$$

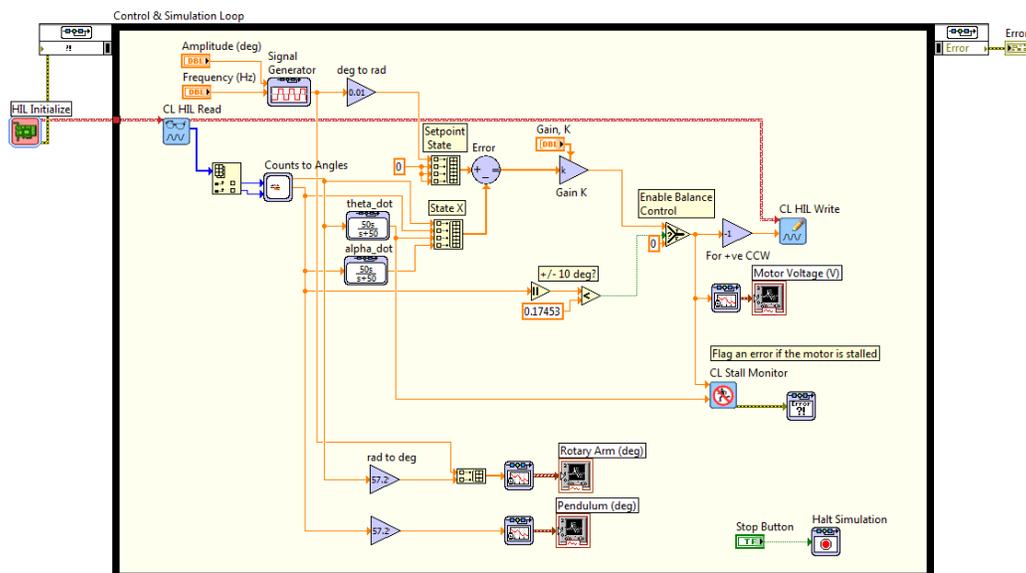
Запишите сгенерированный коэффициент. Как изменение  $q_{11}$  влияет на генерируемый коэффициент? Этого ли вы ожидали, исходя из описания LQR в разделе "Вводная информация" данной лабораторной работы?

## 2.2 LQR-регулирование баланса

Взяв за основу VI из лабораторной работы "Управление балансом", создайте VI, показанный на рисунке 2.4, который балансирует вращающийся маятник QUBE-Servo, используя настраиваемый коэффициент усиления обратной связи  $K$ .



(a) Лицевая панель



(b) Блок-диаграмма

Рисунок 2.4: VI для запуска оптимизированного регулятора баланса

1. Откройте *QUBE-Servo ROTPEN LQR Design.vi*, или используйте VI, созданный ранее в этой лабораторной работе для генерации коэффициента  $K$  на основе LQR и модели QUBE-Servo.
2. Взяв за основу VI, разработанный в лабораторной работе "Управление балансом", создайте регулятор, показанный на рисунке 2.4:
  - Используя углы из подсистемы Counts to Angles, разработанной в лабораторной работе "Управление балансом" (которая преобразует отсчеты энкодера в радианы), постройте

состояние  $x$  по уравнению 1.2. Используйте ФВЧ с характеристикой  $50s/(s + 50)$  для вычисления скоростей  $\theta'$  и  $\alpha'$ , как показано на рисунке 2.4,

- Добавьте необходимые для реализации управления с обратной связью по состоянию блоки Sum и Gain в соответствии с уравнением 1.3. Поскольку коэффициент  $K$  является вектором, убедитесь, что блок Gain настроен на умножение матриц.
  - Добавьте блок Signal Generator для генерации различных необходимых углов плеча  $\theta_r$ . Чтобы сгенерировать опорное состояние  $x_r$  убедитесь, что вы добавили на блок-диаграмму Build Array VI для получения  $[\theta_r \ 0 \ 0 \ 0]$ .
3. Задайте  $K$  в *QUBE-Servo ROTPEN Balance LQR.vi* равным коэффициенту, полученному в пункте 3 части "Расчет линейно-квадратичного регулятора" данной лабораторной работы.
  4. Задайте следующие значения для блока Signal Generator:
    - Type = Square
    - Amplitude = 1
    - Frequency = 0.125 Hz
  5. Установите в элементе управления Amplitude (deg) на лицевой панели значение, равное 0.
  6. Запустите VI.
  7. Вручную поворачивайте маятник в верхнее вертикальное положение до тех пор, пока не включится регулятор.
  8. Когда регулятор будет поддерживать баланс маятника, задайте значение элемента управления Amplitude (deg) равным 30, чтобы угол отклонения плеча изменялся в пределах  $\pm 30$  градусов. На графиках должно быть нечто похожее на рисунок 2.5. Дополните отчет характеристиками вращающегося плеча, маятника и напряжения на контроллере.

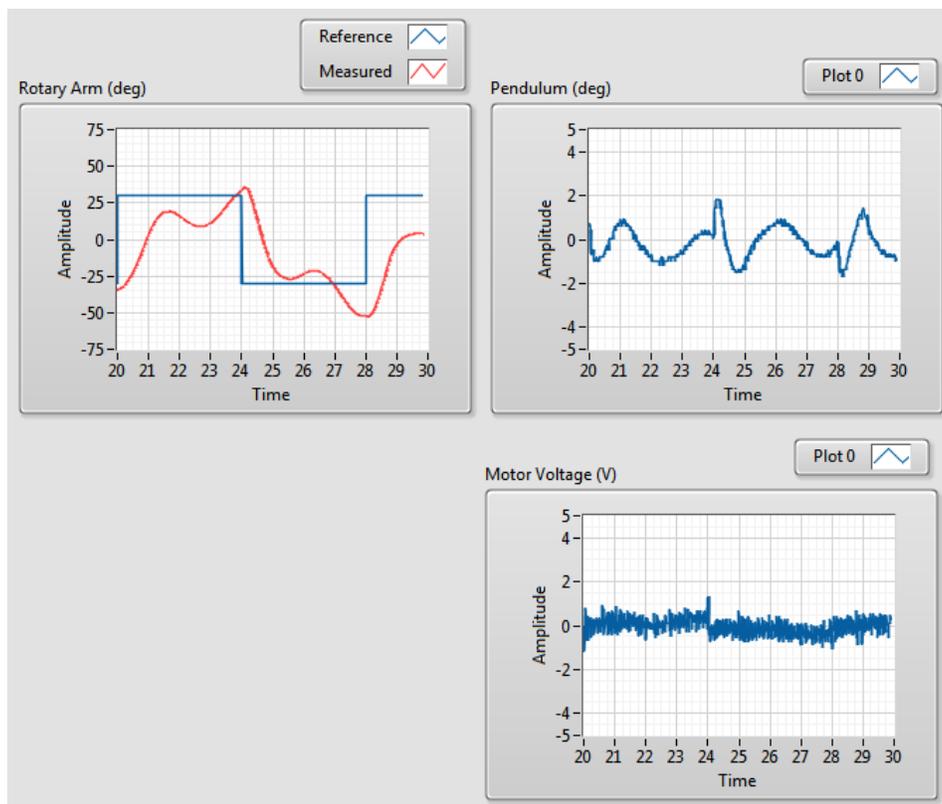


Рисунок 2.5: Характеристика вращающегося маятника QUBE-Servo

9. Установите  $K$  равным коэффициенту усиления, найденному при выполнении пункта 5 части "Расчет линейно-квадратичного регулятора" данной лабораторной работы.
10. Изучите и опишите изменения на графических индикаторах *Rotary Arm (deg)* и *Pendulum (deg)*.
11. Настройте диагональные элементы матрицы  $Q$  для уменьшения отклонения (перерегулирования) маятника при изменении угла отклонения плеча. Опишите экспериментальную процедуру поиска необходимого коэффициента  $K$ .
12. Приведите результирующую матрицу  $Q$  и коэффициент  $K$  регулятора LQR, использованные для получения искомого результата. Приложите к отчету характеристики, полученные с использованием нового коэффициента  $K$ , и кратко опишите, как изменились характеристики.
13. Остановите VI.
14. Выключите питание QUBE-Servo.

© 2014 Quanser Inc., All rights reserved.

Quanser Inc.  
119 Spy Court  
Markham, Ontario  
L3R 5H6  
Canada  
info@quanser.com Телефон: 1-905-  
940-3575  
Факс: 1-905-940-3576

Отпечатано в Маркхэм, Онтарио.

Для получения дополнительной информации о решениях, предлагаемых Quanser Inc., пожалуйста, посетите веб-сайт:  
<http://www.quanser.com>

На данный документ и описанное в нем программное обеспечение распространяются условия лицензионного соглашения. Ни программное обеспечение, ни данный документ не могут быть использованы или скопированы за исключением случаев, предусмотренных лицензионным соглашением. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право на воспроизведение работы, на включение работы в одну или более систем, на воспроизведение работы, представленной в системе, б) право создавать и воспроизводить усовершенствования при условии выполнения обоснованных действий для четкого определения изменений, примененных к оригинальной работе, в) право распространять и публично представлять работу, в том числе в составе систем, г) право распространять и публично представлять усовершенствования. Вышеперечисленные права могут использоваться во всех средствах распространения информации и форматах, известных сейчас или разработанных в будущем. Данные права предоставляются на следующих условиях при следующих ограничениях: а) Запрещено пользоваться любыми вышеперечисленными правами любым способом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, б) Вы должны сохранить нетронутыми все сведения об авторских правах на работу и предоставить наименование Quanser Inc для ссылки на источник. Данные ограничения не могут быть сняты без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

## ВЫ МОЖЕТЕ ПОЛОЖИТЬСЯ НА QUANSER В ОБУЧЕНИИ СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ УРОВНЕ

Больше двух десятилетий компания Quanser сосредоточена исключительно на разработке решений для продвинутого обучения и исследований в области систем управления. Сегодня более 2500 университетов, колледжей и исследовательских институтов по всему миру полагаются на расширяющийся спектр систем управления Quanser.

Наши решения для управления вращением предлагают качество, удобство, простоту использования, непрерывную техническую поддержку и экономию средств. Они являются частью широкого ассортимента решений Quanser для лабораторий управления, спроектированных для приобретения студентами опыта исследований. Эти решения являются полнокомплектными рабочими станциями и могут заинтересовать студентов и аспирантов, мотивировать их к дальнейшему обучению и воодушевить на инновации.

Преподаватели технических наук по всему миру согласны, что рабочие станции Quanser являются надежными и эффективными. Выбор из множества экспериментов по мехатронике и инструментов для проектирования систем управления позволяет вести обучение и исследования на всех уровнях, включая самые современные. Применяйте инженерные знания из мехатроники, электроники, разработки программного обеспечения и проектирования систем управления.

Эффективно используйте курс, структурированный ABET, разработанный в соответствии с высочайшими академическими стандартами. Последнее, но не менее важное - вы можете положиться на инженеров Quanser и получать непрерывную техническую поддержку по мере изменения ваших требований к обучению или исследованиям.

**Узнайте больше на [www.quanser.com](http://www.quanser.com) или свяжитесь с нами по адресу [info@quanser.com](mailto:info@quanser.com)**

Мы в соцсетях:



\*ABET Inc. является признанным аккредитирующим органом для программ колледжей и университетов в области прикладных наук, вычислительной техники и машиностроения. ABET, в числе наиболее уважаемых аккредитирующих организаций в США, обеспечивает руководство и качество в сфере высшего образования более 75 лет.

LabVIEW™ является торговой маркой National Instruments.

Продукты и/или услуги, приведенные и упомянутые здесь, а также их технические характеристики, могут быть изменены без предварительного уведомления. Продукты и/или услуги, упомянутые здесь, являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками Quanser Inc. и/или его партнеров. LabVIEW™ является торговой маркой National Instruments. Windows® является торговой маркой Microsoft. Названия других изделий и производителей также являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками, у которых есть правообладатели.