

РУКОВОДСТВО ДЛЯ СТУДЕНТА

Тренажер “Вращающийся инверсный маятник QNET” для NI ELVIS

Разработано Quanser

Разработчики:

Karl Johan Åström, Ph.D., Lund University (Emeritus)

Jacob Apkarian, Ph.D., Quanser

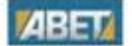
Paul Karam, B.A.Sc., Quanser

Michel Lévis, M.A.Sc., Quanser

Jeannie Falcon, Ph.D., National Instruments



Материалы курса
соответствуют*:



© 2011 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. Все права защищены. Никакую часть данного руководства нельзя переиздавать, сохранять в информационно-поисковых системах и распространять как в электронной, так и в печатной форме путем ксерокопирования, перезаписи или иным способом, без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

Благодарности

Quanser, Inc. хотели бы поблагодарить

доктора Хакэна Гурасака (Университет штата Вашингтон, Ванкувер, США) за помощь по включению встроенной оценки результатов, а также

доктора К. Дж. Эстрома (Университет Лунда, Лунд, Швеция) за неоценимый вклад в содержание курса обучения.

Содержание

1	Введение	4
2	ПРОСТОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	6
2.1	Вводная информация	6
2.2	Виртуальный прибор для простого моделирования	8
2.3	Затухание колебаний [15 минут]	8
2.4	Трение [15 минут]	9
2.5	Момент инерции [30 минут]	9
2.6	Результаты	10
3	УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСОМ	11
3.1	Вводная информация	11
3.2	VI для управления балансом	11
3.3	Анализ модели [20 минут]	13
3.4	Проектирование системы управления и симуляция [45 минут]	14
4	РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ	15
4.1	Вводная информация	15
4.2	VI для управления балансом	15
4.3	Управление балансом по умолчанию [30 минут]	16
4.4	Реализация спроектированного управления балансом [20 минут]	17
4.5	Управление балансом с компенсацией трения [30 минут]	17
5	УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМОМ	19
5.1	Вводная информация	19
5.2	VI для управления подъемом	21
5.3	Управление энергией [30 мин]	21
5.4	Гибридное управление колебаниями [20 минут]	22
6	СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ	23
6.1	Обзор файлов	23
6.2	Simple Modeling Laboratory VI	23
6.3	Control Design VI	24
6.4	Swing-Up Control VI	24
7	ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	32
7.1	Шаблон отчета (Простое моделирование)	32
7.2	Шаблон отчета (Проектирование управления балансом)	33
7.3	Шаблон отчета (Реализация управления балансом)	34
7.4	Шаблон отчета (Управление подъемом)	35
7.5	Советы по оформлению отчета	36
	ССЫЛКИ	37

1 Введение

Задачи регулирования и управления сервомеханизмами очень распространены, но обратная связь имеет и другие полезные применения. Управление, основанное на описании задач - распространенный тип широкого спектра проблем. Например, стабилизацию неустойчивой системы можно рассматривать как проблему, основанную на описании задачи. Однако это – пограничный пример, который может также рассматриваться как проблема регулирования. Управление двухколесным скутером "Сигвей" - типичный пример, когда стабилизация является ключевой задачей. В этом случае стабилизация также объединяется с функциями рулевого управления. Другими примерами могут быть демпфирование колебаний раскачивающегося груза на подъемном кране, стабилизация ракеты при взлете и системы воспроизведения движения человека. В аэрокосмической промышленности много примеров управления, основанного на описании задачи, например, автоматическое приземление и вывод на орбиту спутников. В робототехнике множество подобных задач, например, предотвращение столкновений, планирование движения и управление с использованием машинного зрения. Как правило, управление, основанное на описании задачи, более сложное, чем регулирование и управление сервомеханизмами, и может содержать функции регулирования и управления сервомеханизмами как подзадачи. Мы выбрали вращающийся маятник для иллюстрации управления, основанного на описании задач.

Вращающийся инверсный маятник QNET изображен на рисунке 1.1. Двигатель установлен вертикально в металлической камере. L-образная конструкция соединена с валом электродвигателя и вращается на ± 180 градусов. Маятник подвешен на горизонтальной оси на конце плеча. Угол отклонения маятника измеряется энкодером. Управляющая переменная - входное напряжение, подаваемое на усилитель ШИМ-сигнала, который управляет двигателем. Выходные переменные – угол отклонения маятника и угол поворота вала двигателя.



Рисунок 1.1: Вращающийся инверсный маятник QNET (ROTPEN)

Мы проведем три эксперимента: простое моделирование, управление балансом инверсного маятника и управление подъемом. Эксперименты можно выполнять независимо друг от друга.

Рассматриваемые темы

- Моделирование маятника
- Управление балансом (с обратной связью по состоянию)
- Оптимизация управления (алгоритм LQR)
- Компенсация трения
- Управление энергией
- Гибридное управление

Предварительные требования

Для успешного выполнения этих лабораторных работ студенты должны:

- Знать основы передаточных функций, например, уметь получать передаточную функцию из дифференциального уравнения.
- Уметь использовать **LabVIEW®** для запуска VI.

2 ПРОСТОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1 Вводная информация

Этот эксперимент иллюстрирует некоторые задачи управления портальными кранами. Портал крана - движущаяся платформа или тележка, которая перемещает кран по заводскому цеху или территории порта. Груз крана висит на тросах и перемещается краном. Как правило, задача состоит в быстром перемещении груза в нужное положение. Быстрое движение, необходимое на производстве, усложняет доставку груза в нужное место из-за раскачивания крана. Эту проблему можно симитировать с помощью вращающегося маятника, наблюдая за при движении тележки концом L-образной конструкции, в которой верхушка маятника ведет себя, как перемещаемый груз.

Этот эксперимент мы начнем с моделирования системы и определения стратегий демпфирования колебаний в ней.

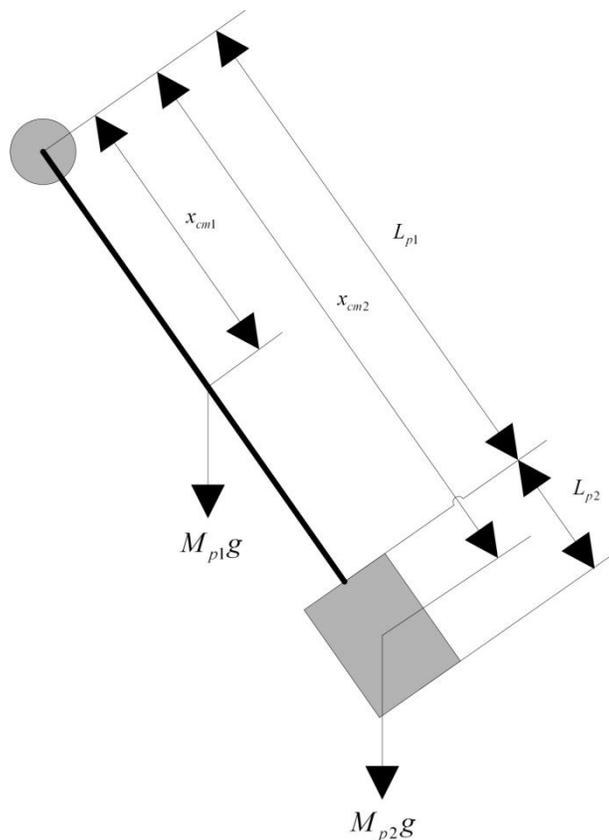


Рисунок 2.1: Силевая схема свободного тела маятника

На рисунке 2.1 показана силевая схема свободного тела маятника, состоящая из двух жестких тел: звена маятника с массой M_{p1} и длиной L_{p1} , и груза маятника с массой M_{p2} и длиной L_{p2} . Центр масс звена маятника и груза маятника рассчитываются отдельно в соответствии с выражениями

$$x_{cm} = \frac{\int p x dx}{\int p dx}$$

где x - линейное расстояние от оси вращения, а p - плотность тела. Круг в верхнем левом углу на рисунке 2.1 обозначает ось вращения или ось качания, которая перпендикулярна плоскости рисунка.

Система маятника далее рассматривается как одно жесткое тело с единственным центром масс, как показано на рисунке 2.2.

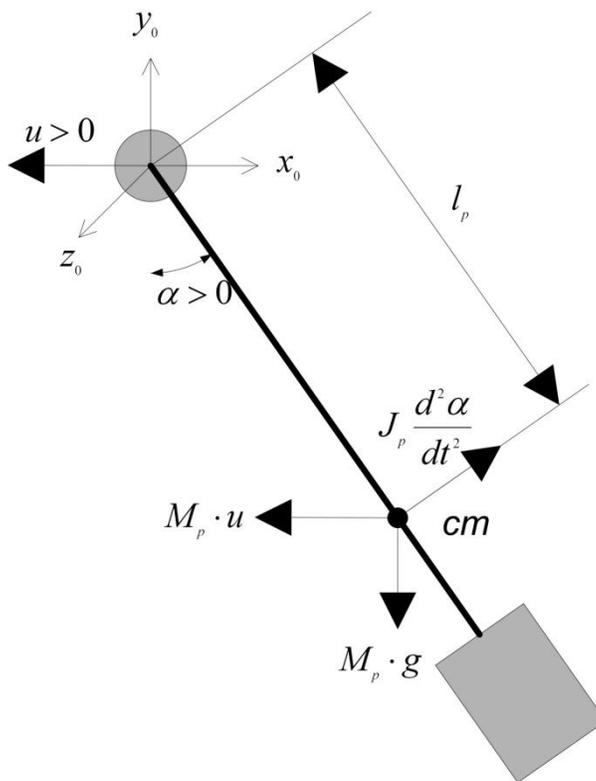


Рисунок 2.2: Силовая схема свободного тела составного маятника

Центр масс составного объекта, состоящего из n тел, можно рассчитать по формуле

$$x_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_{cm,i}}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

где $x_{cm,i}$ – известный центр массы тела i , а m_i – масса тела i .

В соответствии с силовой схемой свободного тела на рисунке 2.2, результирующее нелинейное уравнение движения маятника имеет вид:

$$J_p \ddot{\alpha}(t) = M_p g l_p \sin \alpha(t) + M_p u l_p \cos \alpha(t) \quad (2.1)$$

где J_p – момент инерции маятника относительно оси вращения z_0 , M_p – полная масса сборки маятника, u – линейное ускорение оси вращения, а l_p – положение центра масс (рисунок 2.2). Таким образом, когда ось вращения ускоряется в левом направлении, инерция маятника заставляет его качнуться вверх, в то время как сила тяжести $M_p g$ и приложенная сила $M_p u$ (термы правой части уравнения 2.1) тянут маятник вниз.

Момент инерции маятника можно найти экспериментально. Предполагая, что маятник не приведен в движение, линеаризация уравнения 2.1 и решение дифференциального уравнения дают выражение

$$J_p = \frac{M_p g l_p}{4 f^2 \pi^2} \quad (2.2)$$

где f – измеренная частота колебаний маятника при условии, что маятник остается жестким телом. Частота рассчитывается по формуле

$$f = \frac{n_{cyc}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

где n_{cyc} – количество периодов, а Δt – длительность периодов. С другой стороны, J_p может быть рассчитан по выражению для момента инерции

\int

$$J = \int r^2 dm \quad (2.4)$$

где r – расстояние по нормали между массой элемента dm и осью вращения.

Помимо определения момента инерции, в этой лабораторной работе исследуется также свойственное системе «прилипание». Ротор двигателя постоянного тока, движущий систему ROTPEN, требует определенной силы тока для начала движения. Кроме того, масса системы маятника требует еще большего тока, чтобы действительно начать перемещение системы. Трение особенно серьезно для скоростей, близких к нулю, поскольку его знак меняется с направлением вращения.

Обратитесь к Википедии за получением дополнительной информации о [центре масс](#), [инерции](#), [маятнике](#) и [трении](#).

2.2 Виртуальный прибор для простого моделирования

Виртуальный прибор для изучения физики маятника, симулирующего порталый кран, показан на рисунке 2.3.

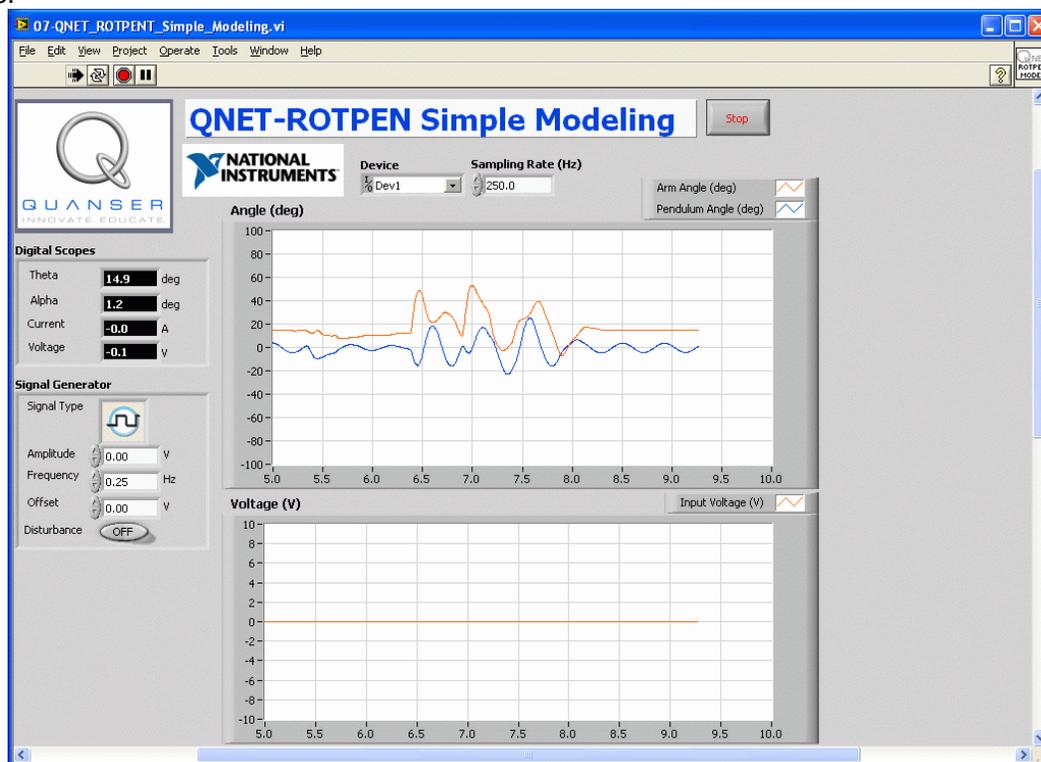


Рисунок 2.3: LabVIEW VI для моделирования вращающегося маятника QNET.

2.3 Затухание колебаний [15 минут]

1. Убедитесь, что QNET ROTPENT Simple Modeling VI открыт и настроен так, как описано в разделе 2.2. **Убедитесь, что устройство (Device) выбрано правильно.**
2. Запустите QNET_ROTPEMPT_Simple_Modeling.vi, показанный на рисунке 2.3.
3. Удерживая плечо вращающегося маятника в неподвижном состоянии, вручную выведите маятник из положения равновесия.
4. Продолжая удерживать плечо, исследуйте характеристику *Pendulum Angle (deg)* на графическом индикаторе *Angle (deg)*. Это отклик системы **маятника**.

5. Повторите пункт 3, но после нескольких колебаний отпустите плечо.
6. Исследуйте характеристику *Pendulum Angle (deg)*, когда плечо не зафиксировано. Это отклик системы **вращающегося маятника**. Сравните отклики маятника и вращающегося маятника и определите, какая система быстрее стремится к нулевому углу отклонения. Почему колебания в одной системе затухают быстрее, чем в другой?
7. Остановите выполнение VI щелчком по кнопке *Stop*.

2.4 Трение [15 минут]

1. Запустите QNET_ROTPEMPT_Simple_Modeling.vi.
2. В разделе *Signal Generator* задайте следующие значения параметров:
 - Amplitude (амплитуда) = 0 В
 - Frequency (частота) = 0.25 Гц
 - Offset (смещение) = 0.0 В
3. Изменяйте параметр *Offset* с шагом в 0.10 В, пока маятник не придет в движение. Запишите напряжение, при котором маятник начал перемещаться.
4. Повторите шаг 3 с шагом -0.10 В.
5. Запишите положительное, V_{fp} , и отрицательное, V_{fn} , напряжения, необходимые для приведения маятника в движение. Почему двигателю требуется определенное напряжение для приведения в движение вала двигателя?
6. Остановите выполнение VI щелчком по кнопке *Stop*.

2.5 Момент инерции [30 минут]

2.5.1 Вопросы для подготовки

1. Найдите момент инерции, действующий относительно оси маятника, используя силовую схему свободного тела. Обязательно оцените его численное значение на основе параметров, приведенных в руководстве QNET ROTPEN User Manual ([2]).

2.5.2 Задание на лабораторную работу

1. Запустите QNET_ROTPEMPT_Simple_Modeling.vi.
2. В разделе *Signal Generator* задайте следующие значения параметров:
 - Amplitude (амплитуда) = 1.0 В
 - Frequency (частота) = 0.25 Гц
 - Offset (смещение) = 0.0 В
3. Щелкните по переключателю *Disturbance*, чтобы вывести маятник из состояния покоя, и измерьте время, за которое маятник совершает несколько циклов колебаний (например, 4 цикла).
4. Найдите частоту и момент инерции маятника, используя полученные результаты. Чтобы узнать, как рассчитать инерцию экспериментально, загляните в раздел 2.1.
5. Сравните момент инерции, вычисленный аналитически в упражнении 1, с моментом инерции, найденным экспериментально. Большое ли несоответствие между ними?

6. Остановите выполнение VI щелчком по кнопке **Stop**.

2.6 Результаты

Занесите полученные вами ответы в таблицу 1.

Описание	Обозначение	Значение	Единица измерения
Раздел 2.4: Трение			
Положительное напряжение кулоновского трения	V_{fp}		B
Отрицательное напряжение кулоновского трения	V_{fn}		B
Раздел 2.5: Момент инерции			
Расчетное значение инерции	J_p		кг · м ²
Экспериментальное значение инерции	$J_{p,exp}$		кг · м ²

Таблица 1: QNET ROTPEN - результаты моделирования

3 УПРАВЛЕНИЕ БАЛАНСОМ

3.1 Вводная информация

Разработано большое количество методов определения параметров стратегий управления. Некоторые из них собраны в инструментальные комплекты, которые относительно просто использовать. Теория линейно-квадратичного регулятора (LQR) - технология, подходящая для нахождения параметров регулятора баланса из уравнения 4.1 в разделе 4. Учитывая, что уравнение движения системы может быть описано, как

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

алгоритм LQR рассчитывает задачу управления u для минимизации критерия

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

Матрица Q определяет штрафной коэффициент переменной состояния, а матрица R - штрафной коэффициент управляющего воздействия. Поэтому при увеличении Q регулятор должен работать интенсивнее для минимизации функции стоимости, и результирующий коэффициент усиления будет больше. В нашем случае вектор состояний x

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

Поскольку у нас всего одна управляющая переменная, то R – скаляр, и стратегия управления для минимизации функции стоимости J имеет вид

$$u = -K(x - x_r) = -k_{p,\theta}(\theta - \theta_r) - k_{p,\alpha}(\alpha - \pi) - k_{d,\theta}\dot{\theta} - k_{d,\alpha}\dot{\alpha}.$$

Теория LQR реализована в модуле **LabVIEW® Control Design and Simulation**. Таким образом, представляя модель системы в виде матриц пространства состояний A и B и матриц весов Q и R , функция LQR в Control Design Toolkit автоматически вычисляет коэффициент передачи в цепи обратной связи контура управления. В этом эксперименте модель уже готова. В лабораторной работе будет исследоваться влияние изменения матрицы весов Q на функцию стоимости J при R равном 1.

Обратитесь к Википедии за получением дополнительной информации об [оптимальном управлении](#).

3.2 Balance Control Design VI

QNET_ROTPEM_Control_Design VI имеет три закладки. Каждая из них рассматривается в последующих разделах.

3.2.1 Закладка Symbolic Model

Закладка *Symbolic Model* (символьная модель), показанная на рисунке 3.1, служит для задания настроек модели вращающегося маятника QNET.

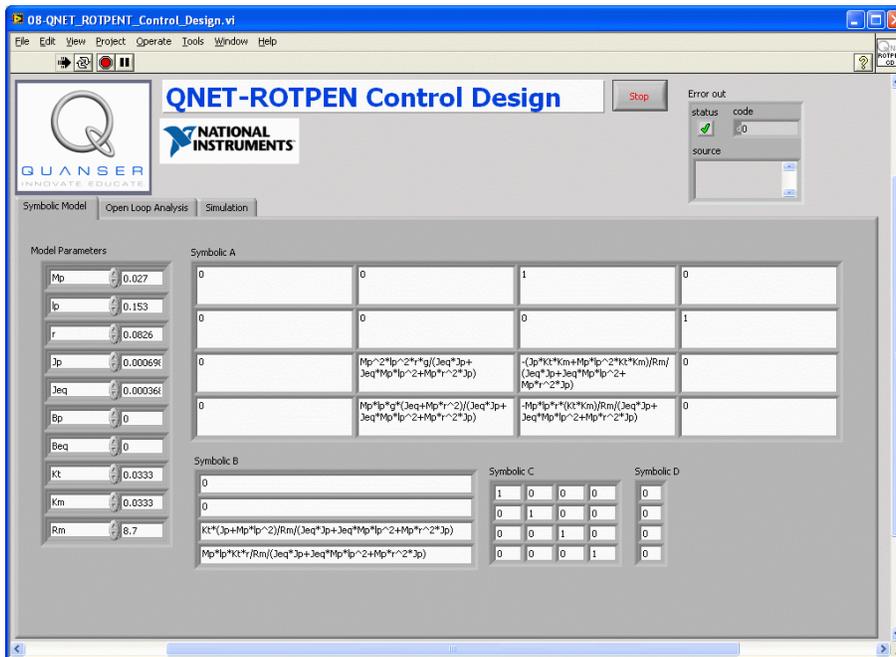


Рисунок 3.1: LabVIEW VI для генерации модели вращающегося маятника QNET в пространстве состояний.

3.2.2 Закладка Open Loop Analysis

Закладка *Open Loop Analysis* (анализ разомкнутой системы), показанная на рисунке 3.2, служит для анализа устойчивости разомкнутой системы вращающегося маятника QNET.

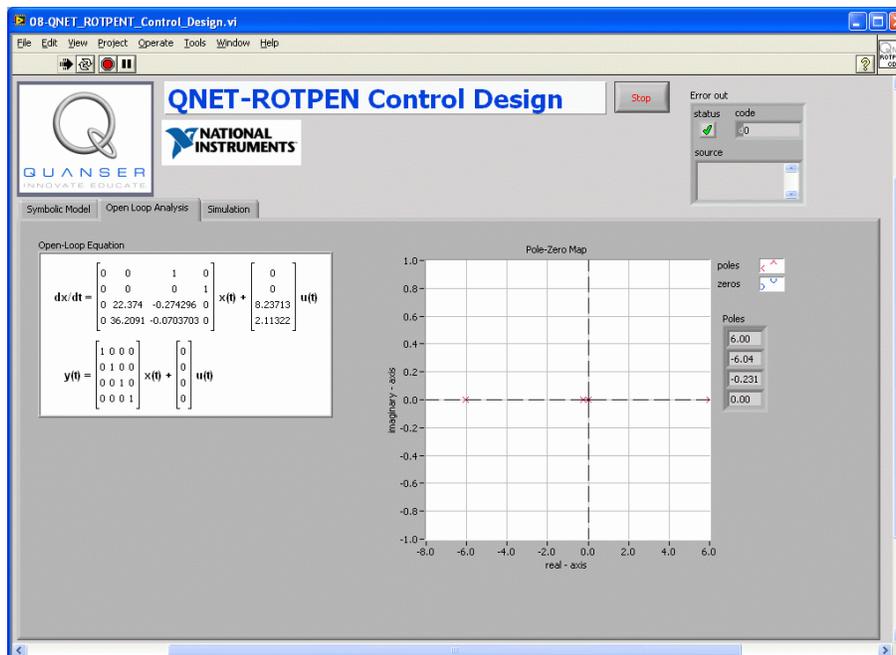


Рисунок 3.2: LabVIEW VI для анализа устойчивости разомкнутой системы вращающегося маятника QNET.

3.2.3 Закладка Simulation

На закладке *Simulation* (симуляция), показанной на рисунке 3.3, пользователи могут генерировать коэффициенты системы управления балансом вращающегося маятника QNET, используя алгоритм LQR и симулируя замкнутую систему.

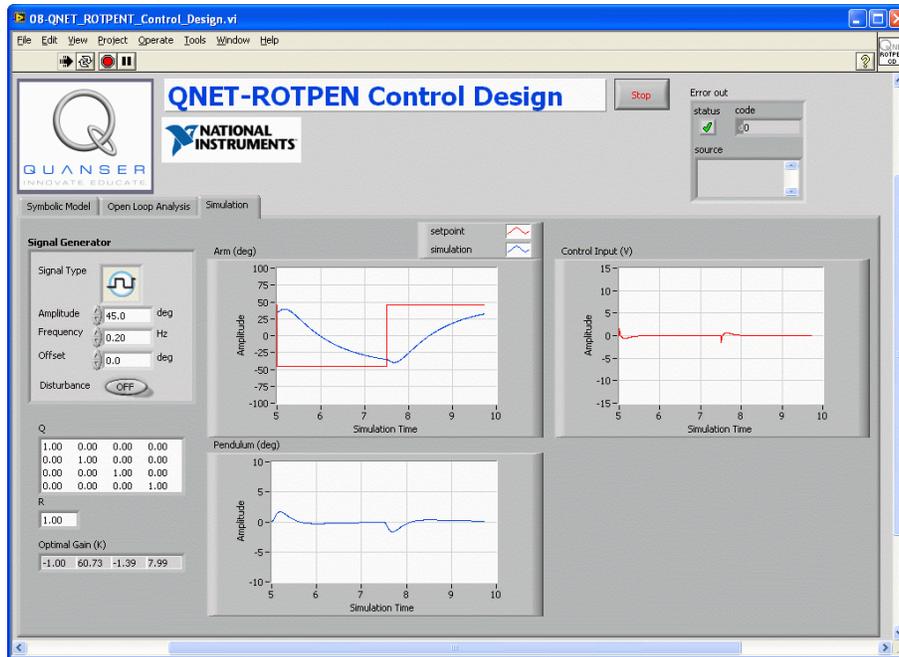


Рисунок 3.3: LabVIEW VI для разработки управления балансом вращающегося маятника QNET.

3.3 Анализ модели [20 минут]

1. Откройте QNET_ROTPEM_Control_Design.vi.
2. Запустите QNET_ROTPEM_Control_Design.vi. Лицевая панель VI показана на рисунке 3.1.
3. Перейдите на закладку *Symbolic Model*.
4. В массиве *Model Parameters* содержатся все переменные модели вращающегося маятника, которые используются в матрицах пространства состояний *A*, *B*, *C* и *D*.
5. Перейдите на закладку *Open Loop Analysis*, показанную на рисунке 3.2.
6. На ней представлены линейная модель в пространстве состояний в числовом виде и график нулей и полюсов разомкнутой системы инверсного маятника. Что вы заметили в положении полюсов разомкнутой системы? Как это влияет на систему?
Рекомендуется: В разделе *Model Parameters* введите момент инерции маятника J_p , экспериментально полученный в разделе 2.5.
7. На закладке *Symbolic Model* задайте момент инерции маятника J_p равным 1.0×10^{-5} кг · м².
8. Перейдите на закладку *Open Loop Analysis*. Как изменилось положение полюсов разомкнутой системы при изменении момента инерции? Запишите расположение полюсов для каждой системы с разными значениями момента инерции. Таких ли изменений вы ожидали при уменьшении инерции маятника?
9. Снова сделайте момент инерции маятника J_p равным 1.77×10^{-4} кг · м².
10. Остановите выполнение VI щелчком по кнопке **Stop**.

3.4 Проектирование системы управления и симуляция [45 минут]

1. Откройте QNET_ROTPEM_Control_Design.vi.
2. Перейдите на закладку *Simulation*.
3. Запустите VI. Работающий VI показан на рисунке 3.3.
4. В разделе *Signal Generator* задайте следующие значения параметров:
 - Amplitude (амплитуда) = 45.0 градусов
 - Frequency (частота) = 0.20 Гц
 - Offset (смещение) = 0.0 градусов
5. Задайте следующие значения матриц весов Q и R для алгоритма LQR:
 - $Q(1,1) = 10$, то есть задайте первый элемент матрицы Q равным 10
 - $R = 1$

При изменении матрицы Q генерируется новый коэффициент системы управления.

6. Задающая характеристика плеча (красная) и симулированная характеристика плеча (синяя) показаны на графическом индикаторе *Arm (deg)*. Как изменяется отклик плеча? Как изменился отклик маятника на графике *Pendulum (deg)*?
7. Задайте третий элемент матрицы Q равным 0, то есть $Q(3,3) = 0$.
8. Изучите и опишите изменения на графиках *Arm (deg)* и *Pendulum (deg)*.
9. Изменяя диагональные элементы матрицы Q , разработайте контроллер баланса, удовлетворяющий следующим требованиям:
 - Время пика плеча меньше 0.75 с: $t_p \leq 0.75$ с.
 - Пик напряжения на двигателе меньше ± 12.5 В: $|V_m| \leq 12.5$ В.
 - Угол отклонения маятника меньше 10.0 градусов: $|\alpha| \leq 10.0^\circ$

Занесите в отчет матрицы Q и R , а также коэффициент управления, удовлетворяющий этим требованиям.

10. Приложите графики с индикаторов *Arm (deg)*, *Pendulum (deg)* и *Control Input (V)* разработанного вами контроллера баланса. Удовлетворяет ли он заданным требованиям?
11. Остановите выполнение VI щелчком по кнопке **Stop**

4 РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ

4.1 Вводная информация

Балансирование - распространенная задача управления. В этом эксперименте мы определим стратегии управления балансированием маятника в вертикальном положении при сохранении требуемого положения плеча маятника. В состоянии баланса системы угол отклонения маятника α мал, и балансированием можно управлять с помощью простого ПД-регулятора. Если, кроме того, нам необходимо удерживать плечо в заданном положении, должна быть введена обратная связь по положению плеча. Тогда закон регулирования можно описать как

$$u = -k_{p,\theta}(\theta - \theta_r) - k_{p,\alpha}(\alpha - \pi) - k_{d,\theta}\dot{\theta} - k_{d,\alpha}\dot{\alpha} \quad (4.1)$$

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

Существует множество способов определения параметров регулятора. Как упоминалось в разделе 3.1, один из методов основан на линейно-квадратичном оптимальном управлении. Но сначала поведение системы будет исследоваться с параметрами по умолчанию.

В процессе балансирования маятника над фиксированной точкой плечо колеблется относительно заданной точки вследствие трения, свойственного двигателю. Из-за трения двигатель не повернется, пока управляющий сигнал не станет достаточно большим, и созданный вращающий момент не станет больше силы "прилипания" (за подробностями обратитесь к разделу 2.1). Это означает, что маятнику придется упасть на определенный угол, прежде чем двигатель повернется, что, в конечном счете, вызывает колебательные движения.

Трение может быть скомпенсировано введением возмущающего сигнала в напряжение, подаваемое на электродвигатель постоянного тока. Используемый возмущающий сигнал имеет вид

$$V_d = A_d \sin f_d t + V_{d0}$$

где A_d - амплитуда напряжения, f_d - частота синусоиды, а V_{d0} - напряжение смещения сигнала.

Обратитесь к Википедии за получением дополнительной информации о [ПИД-регулировании](#) и [трении](#).

4.2 VI для управления балансом

Виртуальный прибор для управления балансированием (и для подъема маятника, который будет рассматриваться позже) вращающегося маятника QNET показан на рисунке 4.1.

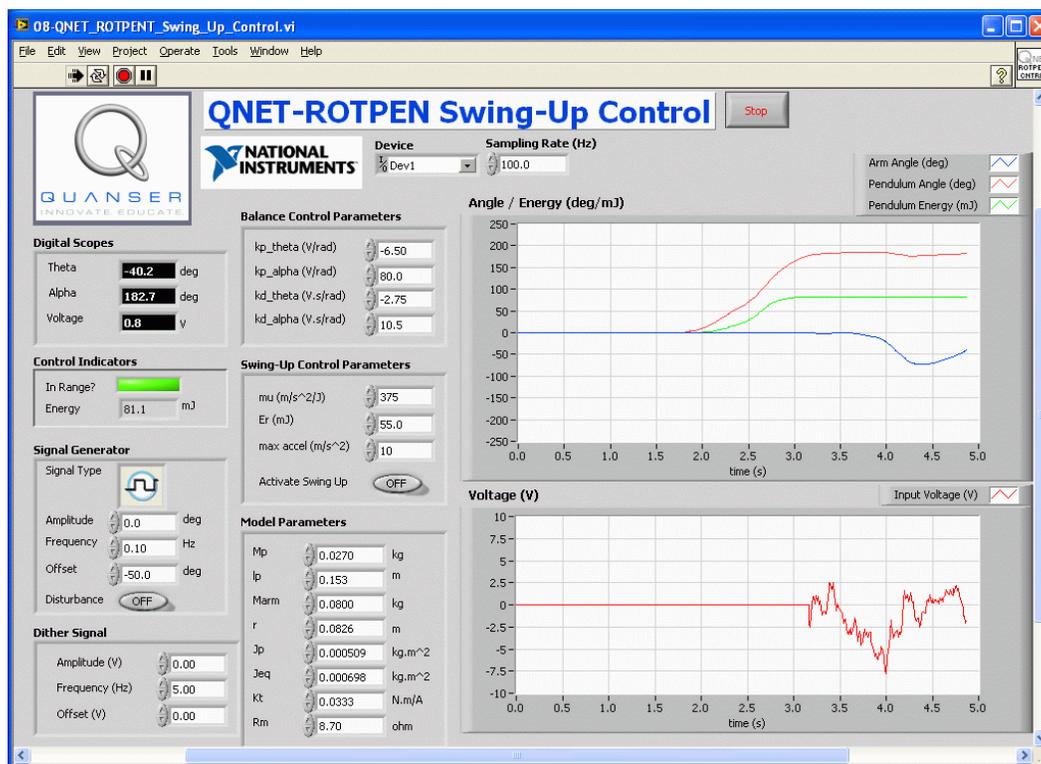


Рисунок 4.1: LabVIEW VI для управления балансом (и подъемом) вращающегося маятника QNET.

4.3 Управление балансом по умолчанию [30 минут]

1. Откройте QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi и убедитесь, что он настроен так, как описано в разделе 6. **Убедитесь, что устройство (Device) выбрано правильно.**
2. Запустите QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi. На индикаторах должны отображаться графики, подобные графикам на рисунке 4.1.
3. В разделе *Signal Generator (генератор сигналов)* задайте:
 - Amplitude (амплитуда) = 0.0 градусов
 - Frequency (частота) = 0.10 Гц
 - Offset (смещение) = 0.0 градусов
4. В разделе *Balance Control Parameters (параметры управления балансом)* задайте:
 - $k_p_theta = -6.5$ В/рад
 - $k_p_alpha = 80$ В/рад
 - $k_d_theta = -2.75$ В/(рад/с)
 - $k_d_alpha = 10.5$ В/(рад/с)
5. В разделе *Swing-Up Control Parameters (параметры управления подъемом)* задайте:
 - $\mu = 55$ м/с²/Дж
 - $E_r = 20.0$ мДж
 - max accel = 10 м/с²
 - Activate Swing-Up = OFF (не нажата)
6. Настройте шкалу графического индикатора *Angle/Energy (deg/mJ)* от -250 до 250 (см. ссылку [2]).

7. Вручную переведите маятник в верхнее вертикальное положение, пока светодиод *In Range?* в разделе *Control Indicators* не загорится ярким зеленым цветом. **Убедитесь, что кабель энкодера не мешает движению плеча маятника.**
8. Изменяйте значение *Offset* и наблюдайте характеристику *Arm Angle (deg)* на графическом индикаторе *Angle/Energy (deg/mJ)*. **Не задавайте слишком большое значение *Offset*, чтобы кабель энкодера не мешал движению плеча маятника.**
9. Когда маятник начнет балансировать относительно заданного положения, составьте описание характеристик *Arm Angle (deg)* и *Pendulum Angle (deg)*, отображаемых на графическом индикаторе *Angle/Energy (deg/mJ)*.
10. В разделе *Signal Generator* задайте следующие значения параметров:
 - Amplitude (амплитуда) = 45.0 градусов
 - Frequency (частота) = 0.10 Гц
 - Offset (смещение) = 0.0 градусов
11. Наблюдайте за поведением системы при подаче сигнала управления прямоугольной формы углом отклонения плеча. Почему сначала плечо движется в неправильном направлении?
12. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

4.4 Реализация спроектированного управления балансом [20 минут]

1. Изучите раздел 3.4 и спроектируйте систему управления балансом в соответствии с заданными требованиями.
Замечание: Рекомендуется использовать экспериментально определенный момент инерции маятника, найденный в разделе 2.5.
2. Откройте *QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi* и убедитесь, что он настроен так, как описано в разделе 6. **Убедитесь, что устройство (Device) выбрано правильно.**
3. Запустите *QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi*. На индикаторах должны отображаться графики, подобные графикам на рисунке 4.1.
4. В разделе *Signal Generator* задайте:
 - Amplitude = 45.0 градусов
 - Frequency = 0.20 Гц
 - Offset = 0.0 градусов
5. Для реализации контроллера баланса введите коэффициенты системы управления, найденные в разделе 3.4, в элементы *kp_theta*, *kp_alpha*, *kd_theta* и *kd_alpha* раздела *Control Parameters*.
6. Вручную переведите маятник в верхнее вертикальное положение, пока светодиод *In Range?* из раздела *Control Indicators* не загорится ярким зеленым цветом. **Убедитесь, что кабель энкодера не мешает движению плеча маятника.**
7. Включите в отчет характеристики, отображаемые на индикаторах *Angle/Energy (deg/mJ)* и *Voltage (V)*. Удовлетворяет ли ваша система требованиям из раздела 3.4?
8. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

4.5 Управление балансом с компенсацией трения [30 минут]

1. Выполните пункты 1-7 раздела 4.3 для реализации управления балансом по умолчанию. Маятник должен балансироваться.

2. В разделе *Signal Generator* задайте:
 - Amplitude = 0.0 градусов
 - Frequency = 0.10 Гц
 - Offset = 0.0 градусов
3. В разделе *Dither Signal* (возмущающий сигнал) задайте:
 - Amplitude = 0,00 В
 - Frequency = 2.50 Гц
 - Offset = 0.0 В
4. Наблюдайте характеристики *Arm Angle (deg)* на графическом индикаторе *Angle/Energy (deg/mJ)*. Можете ли вы интуитивно привести возможные причины колебательных перемещений плеча?
5. Увеличивайте значение параметра *Amplitude* в разделе *Dither Signal* с шагом в 0.1 В, пока не заметите изменений отклика угла отклонения плеча.
6. Как влияет возмущающий сигнал на график *Voltage (V)* и на движение маятника? Сравните отклик плеча с возмущающим сигналом и без него.
7. Увеличивайте значение параметра *Frequency* в разделе *Dither Signal*, начиная с 1.00 до 10.0 Гц.
8. Как это влияет на отклик плеча маятника?
9. Задайте свойства *Dither Signal* в соответствии с трением, измеренным в разделе 2.4. Как это влияет на отклик плеча маятника?
10. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

5 УПРАВЛЕНИЕ ПОДЪЕМОМ

5.1 Вводная информация

5.1.1 Управление энергией

Если угол отклонения плеча поддерживается постоянным, и маятник переведен в исходное положение, он будет колебаться с постоянной амплитудой. Однако из-за трения колебания будут затухать. Назначение управления энергией состоит в том, чтобы так управлять маятником, чтобы трение оставалось постоянным. Потенциальная энергия маятника равна

$$E_p = M_p g l_p (1 - \cos \alpha) \quad (5.1)$$

А кинетическая энергия

$$E_k = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2. \quad (5.2)$$

Потенциальная энергия равна нулю, когда маятник находится в покое при $\alpha = 0$ на рисунке 2.2, и равна $2M_p g l_p$, когда маятник в верхнем вертикальном положении при $\alpha = \pm\pi$. Сумма потенциальной и кинетической энергии маятника составляет

$$E = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 + M_p g l_p (1 - \cos \alpha). \quad (5.3)$$

Продифференцировав уравнение 5.3, получаем

$$\dot{E} = \dot{\alpha} (J_p \ddot{\alpha} + M_p g l_p \sin \alpha). \quad (5.4)$$

Подставив уравнение движения маятника по уравнению 2.1 для ускорения маятника в уравнение 5.4, получим

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

Поскольку ускорение оси вращения пропорционально току, управляющему плечом маятника, и, следовательно, приложенному напряжению, мы обнаруживаем, что можно просто управлять энергией маятника. Закон пропорционального регулирования

$$u = (E_r - E) \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (5.5)$$

приводит энергию к опорному значению энергии E_r . Обратите внимание, что закон управления нелинеен, поскольку коэффициент пропорциональности зависит от угла поворота маятника α . Обратите также внимание, что управляющее воздействие изменяет знак при изменении знака $\dot{\alpha}$ и когда угол равен ± 90 градусов.

Однако для быстрого изменения энергии требуется большая амплитуда управляющего сигнала. В результате в LabVIEW VI реализован контроллер маятника:

$$u = \text{sat}_{u_{max}} (\mu (E_r - E) \text{sign}(\dot{\alpha} \cos \alpha)) \quad (5.6)$$

где μ - настраиваемый коэффициент управления, а функция $\text{sat}_{u_{max}}$ ограничивает управляющий сигнал (вводит в насыщение) при максимальном ускорении оси вращения маятника, u_{max} .

Обратитесь к Википедии для получения дополнительной информации о [потенциальной энергии](#), [кинетической энергии](#), [теории управления](#) и [нелинейном управлении](#).

5.1.2 Гибридное управление колебаниями

Управление подъемом путем задания подаваемой энергии по уравнению 5.5 (или 5.6) может быть объединено с алгоритмом управления балансом из уравнения 4.1 для получения алгоритма, который решает двойную задачу – поднимает маятник вверх и балансирует его. Как показано на рисунке 5.1, этого можно добиться путем переключения между двумя системами управления.

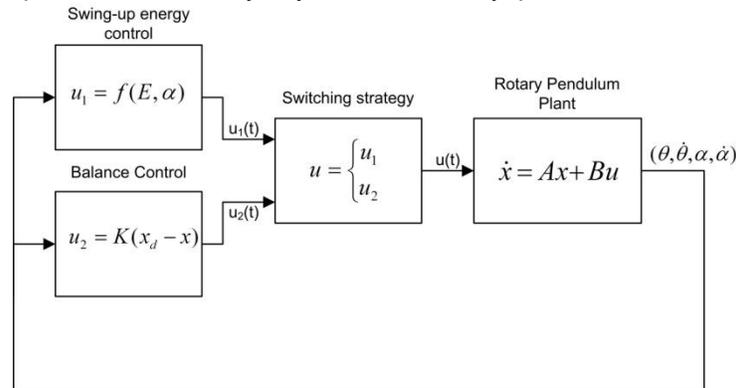


Рисунок 5.1: Гибридное управление колебаниями

Swing-up energy control – управление энергией подъема, Balance control – управление балансом, Switching Strategy – стратегия переключения, Rotary Pendulum Plant – механизм вращающегося маятника.

Эту систему можно смоделировать как гибридную. Гибридные системы – это системы, состоящие из непрерывной и дискретной частей. В нашей системе две непрерывных части: замкнутая система, использующая контроллер подъема с управлением по энергии и замкнутая система с ПД-регулятором баланса. Стратегия переключения – дискретный элемент, который выбирает, какой контроллер или систему запускать. Логику переключения можно получить, определив область в пространстве состояний, где хорошо работает балансировка. Управление балансом будет использоваться в этой области, а управление энергией – за пределами этой области. На рисунке 5.2 показан гибридный автомат, который для данной конкретной задачи можно использовать для описания модели системы и логики переключения.

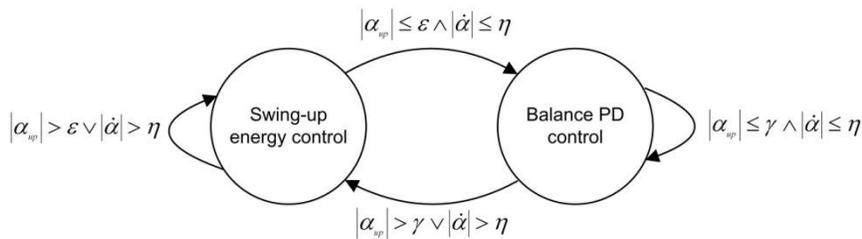


Рисунок 5.2: Гибридный автомат контроллера колебаний

Swing-up energy control – управление энергией подъема, Balance PD control – ПД-управление балансом,

Круги на рисунке 5.2 называются *состояниями (locations)* и отображают две различные непрерывные системы. Стрелки называются *дугами (edges)* и отображают дискретные переходы при выполнении определенных условий. Угол, используемый в логике переключения на рисунке 5.2, называется вертикальным углом. Он равен нулю, когда маятник вблизи своего вертикального положения, и выражается математически формулой

$$\alpha_{up} = \alpha \bmod 2\pi - \pi.$$

Различные параметры переключения на рисунке 5.2 могут быть установлены как

$$\begin{aligned} \epsilon &= 2 \text{ градуса} \\ \eta &= 720 \text{ градусов/сек} \\ \gamma &= 30 \text{ градусов} \end{aligned}$$

Когда маятник начинает движение из нижнего вертикального положения, это значит, что гибридный автомат находится в состоянии подъема. Контроллер подъема накачивает энергию в маятник, пока он не начнет раскачиваться в пределах $\pm 2^\circ$ относительно верхнего вертикального положения. Как только маятник попадет в этот диапазон и его скорость перемещения не превысит $720^\circ/\text{с}$ в каждом направлении, выполняется переход по дуге для включения контроллера баланса. Система остается в состоянии ПД-регуляции баланса, пока отклонение маятника не превысит угол $\pm 30^\circ$ или скорость колебаний не станет более $\pm 720^\circ/\text{с}$.

5.2 VI для управления подъемом

Виртуальный прибор, используемый для запуска контроллера подъема вращающегося маятника QNET – такой же, что и контроллер баланса, изображенный на рисунке 4.1 в разделе 4.2.

5.3 Управление энергией [30 мин]

1. Откройте QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi и убедитесь, что он настроен так, как описано в разделе 6. **Убедитесь, что устройство (Device) выбрано правильно.**
2. Запустите QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi. На индикаторах должны отображаться графики, подобные графикам на рисунке 4.1.
3. Убедитесь, что в разделе *Balance Control Parameters* установлены следующие значения параметров:
 - $k_p_theta = -6.5$ В/рад
 - $k_p_alpha = 80,0$ В/рад
 - $k_d_theta = -2.75$ В/(рад/с)
 - $k_d_alpha = 10.5$ В/(рад/с)
4. В разделе *Swing-Up Control Parameters* – установите следующие значения:
 - $m_i = 55$ м/с²/Дж
 - $E_r = 20.0$ мДж
 - $\max\ accel = 10$ м/с² д
 - Activate Swing-Up = OFF (не нажата)
5. Настройте шкалу графического индикатора *Angle/Energy (deg/mJ)* на диапазон от -250 до 250 (см. руководство пользователя ROTPEN User Manual [2]).
6. Вручную поворачивайте маятник на различные углы и исследуйте графики *Pendulum Angle (deg) (синего цвета)* и *Pendulum Energy (mJ) (зеленого цвета)* на индикаторе *Angle/Energy (deg/mJ)*. Энергия маятника отображается также в числовом формате в разделе *Control Indicators*.
7. Что вы заметили на графике энергии при перемещении маятника в разные положения? Запишите значение энергии, при которой маятник балансируется (то есть полностью инвертирован и находится в верхнем вертикальном положении).
8. Щелкните по кнопке *Stop* для возвращения маятника в нижнее положение портала и снова запустите VI.
9. В разделе *Swing-Up Control Parameters* переведите переключатель *Activate Swing-Up* в положение ON (нажатое).
10. Если маятник не пришел в движение, щелкните по кнопке *Disturbance* в разделе *Signal Generator* для

запуска маятника.

11. В разделе *Swing-Up Control Parameters* изменяйте опорную энергию E_r от 5.0 мДж до 50.0 мДж. В процессе изменения исследуйте управляющий сигнал по графику *Voltage (V)*, а также характеристики *Pendulum Angle (deg)* (синего цвета) и *Pendulum Energy (mJ)* (красного цвета) на графическом индикаторе *Angle/Energy (deg/mJ)*. Включите в отчет графики *Angle/Energy (deg/mJ)* и *Voltage (V)*.
12. В разделе *Control Parameters* задайте E_r равной 20 мДж и изменяйте управляющий коэффициент μ между 10 и 100 м/с²/Дж. Опишите, как это влияет на эффективность управления энергией.
13. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

5.4 Гибридное управление колебаниями [20 минут]

1. Откройте QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi и убедитесь, что он настроен так, как описано в разделе 6. **Убедитесь, что устройство (Device) выбрано правильно.**
2. Запустите QNET_ROTPEM_Swing_Up_Control.vi. На индикаторах должны отображаться графики, подобные графикам на рисунке 4.1.
3. Убедитесь, что в разделе *Balance Control Parameters* установлены следующие значения параметров:
 - $k_p_{theta} = -6.5$ В/рад
 - $k_p_{alpha} = 80,0$ В/рад
 - $k_d_{theta} = -2.75$ В/(рад/с)
 - $k_d_{alpha} = 10.5$ В/(рад/с)
4. В разделе *Swing-Up Control Parameters* - установите следующие значения:
 - $\mu = 55$ м/с²/Дж
 - $E_r = 20.0$ мДж
 - $\max\ accel = 10$ м/с²
 - *Activate Swing-Up* = OFF (не нажата)
5. Настройте шкалу графического индикатора *Angle/Energy (deg/mJ)* на диапазон от -250 до 250 (см. руководство пользователя ROTPEN User Manual [2]).
6. Убедитесь, что маятник находится в нижнем вертикальном положении в состоянии покоя, и кабель энкодера не мешает его движению.
7. В разделе *Swing-Up Control Parameters* установите переключатель *Activate Swing-Up* в положение ON (нажатое).
8. Маятник должен начать раскачиваться. Если этого не произошло, щелкните по кнопке *Disturbance* в разделе *Signal Generator* для запуска маятника. **Выключите переключатель *Active Swing-Up*, если колебания маятника станут нестабильными или если кабель энкодера мешает движению плеча маятника.**
9. Постепенно увеличивайте опорную энергию E_r в разделе *Control Parameters*, пока маятник не достигнет верхнего вертикального положения.
10. Какая опорная энергия потребовалась для подъема маятника? Это ли значение вы ожидали получить?
11. Щелкните по кнопке *Stop*, чтобы остановить VI.

6 СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Необходимое оборудование

- NI ELVIS II (или NI ELVIS I)
- Тренажер Quanser "Вращающийся инверсный маятник QNET (ROTPENT)". Обратитесь к руководству пользователя QNET ROTPENT User Manual ([2]).

Необходимое программное обеспечение

- NI LabVIEW® 2010 или выше
- Модуль NI LabVIEW® Control Design and Simulation
- Для пользователей *ELVIS II*: NI ELVISmx (установка требует драйверов NI DAQmx)
- Для пользователей *ELVIS I*:
 - NI DAQmx
 - ELVIS CD 3.0.1 или выше

■ **Внимание:** без установки этих программ VI не будут запускаться! Пожалуйста, убедитесь, что установлены все программные и аппаратные компоненты. При возникновении затруднений обратитесь к разделу troubleshooting (решение проблем) в руководстве QNET ROTPENT User Manual ([2]).

6.1 Обзор файлов

Имя файла	Описание
QNET ROTPENT User Manual.pdf	В этом руководстве описывается аппаратная часть тренажера "Вращающийся инверсный маятник QNET" и его установка на ELVIS.
QNET ROTPENT Workbook (Student).pdf	В этом руководстве по выполнению лабораторных работ содержатся вопросы для подготовки к лабораторной работе и эксперименты, демонстрирующие разработку и реализацию контроллеров в системе QNET DCMCT при помощи LabVIEW®.
QNET_ROTPEMPT_Simple_Modeling.vi	Подключение напряжения к двигателю постоянного тока и изучение откликов вращающегося плеча и звена маятника.
QNET_ROTPEMPT_Control_Design.vi	Проектирование и симуляция контроллера баланса на основе алгоритма LQR.
QNET_ROTPEMPT_Swing_Up_Control.vi	Управление подъемом и балансирование маятника.

Таблица 2: Файлы, поставляемые в составе лаборатории QNET ROTPENT.

6.2 Simple Modeling Laboratory VI

QNET-ROTPENT Simple Modeling VI показан на рисунке 1.1. Он запускает двигатель постоянного тока, с которым соединено плечо маятника разомкнутой системы, и выводит на график соответствующие углы

плеча и звена маятника, а также приложенное к двигателю входное напряжение. В таблице 3 перечислены и описаны основные элементы лицевой панели виртуального прибора ROTPENT Simple Modeling. Каждый элемент имеет уникальный идентифицирующий номер; положение элемента и его номер показаны на рисунке 6.1.

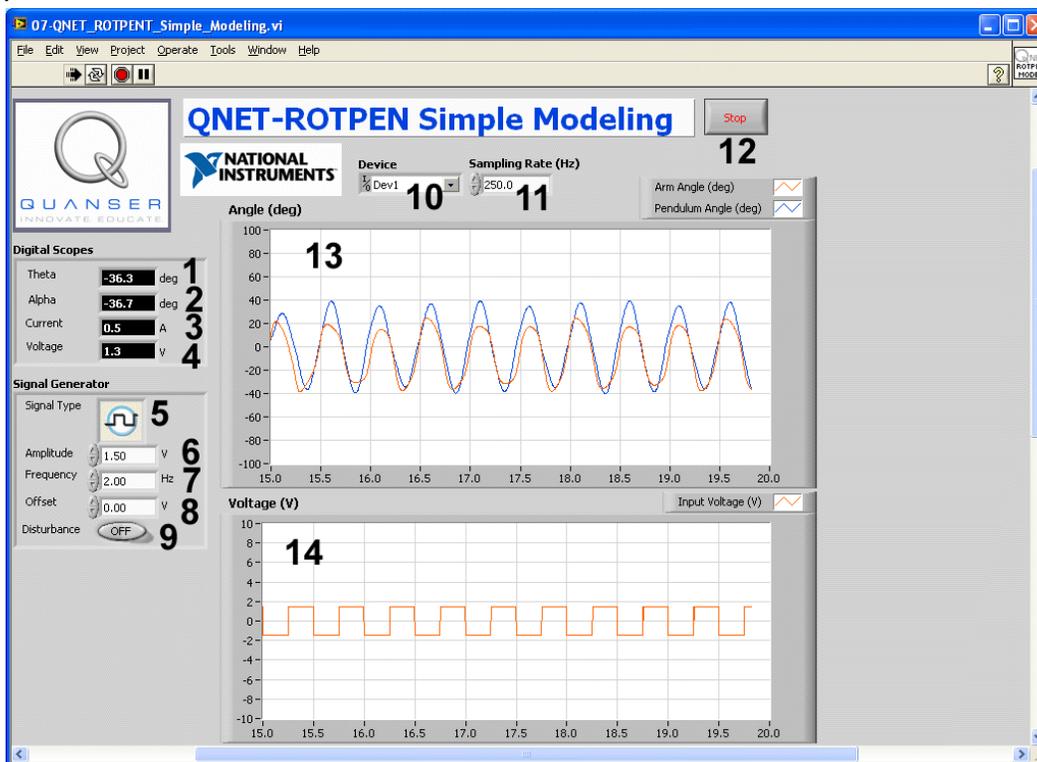


Рисунок 6.1. Виртуальный прибор QNET-ROTPENT Simple Modeling.

6.3 Control Design VI

QNET ROTPENT Control Design VI позволяет спроектировать контроллер баланса и симулировать его отклик. Матрицы для модели в пространстве состояний вращающегося инверсного маятника приведены на закладке *Symbolic Model* и показаны на рисунке 6.2. Значения переменных, используемых в модели пространства состояний, можно изменять. На закладке *Open Loop Analysis*, показанной на рисунке 6.3, отображается числовая модель системы в пространстве состояний, а полюса разомкнутой системы отображаются на фазовой плоскости. На основании этой модели можно реализовать контроллер для балансирования вращающегося инверсного маятника, используя теорию линейно-квадратичного регулятора (LQR), как показано на закладке *Simulation* на рисунке 6.4. Результирующая замкнутая система инверсного маятника может быть симулирована. В таблице 4 перечислены и описаны основные элементы лицевой панели виртуального прибора ROTPENT Control Design. Каждый элемент имеет уникальный идентифицирующий номер; положение элемента и его номер показаны на рисунках 6.2, 6.3 и 6.4.

6.4 Swing-Up Control VI

QNET Rotary Pendulum Trainer Swing-Up Control VI реализует контроллер с управлением по энергии, с помощью которого маятник поднимается в верхнее вертикальное положение, и контроллер с обратной связью по состоянию для балансирования маятника в этом положении. Основные элементы лицевой панели этого VI приведены в таблице 5 и обозначены на рисунке 6.5 соответствующими идентификационными номерами.

Идент. номер	Метка	Обознач.	Описание	Единицы измерения
1	Theta (Тета)	θ	Числовой индикатор угла поворота плеча, измеряемого с помощью энкодера на двигателе.	градусы
2	Alpha (Альфа)	α	Числовой индикатор угла поворота маятника, измеряемого с помощью энкодера на оси маятника.	градусы
3	Current (Ток)	I_m	Числовой индикатор тока якоря двигателя.	А
4	Voltage (Напряжение)	V_m	Числовой индикатор напряжения на двигателе.	В
5	Signal Type (Тип сигнала)		Тип генерируемого сигнала напряжения.	
6	Amplitude (Амплитуда)		Поле ввода амплитуды генерируемого сигнала.	В
7	Frequency (Частота)		Поле ввода частоты генерируемого сигнала.	Гц
8	Offset (смещение)		Поле ввода смещения генерируемого сигнала.	В
9	Disturbance (Возмущение)	V_{sd}	Применение симулированного возмущающего напряжения.	В
10	Device (Устройство)		Выбор устройства NI DAQ.	
11	Sampling Rate (Частота дискретизации)		Задание частоты дискретизации VI.	Гц
12	Stop		Останов LabVIEW VI.	
13	Графический индикатор: Angle (Угол)	θ, α	Графический индикатор результатов измерения угла поворота плеча (красный) и угла поворота звена маятника (синий).	градусы
14	Графический индикатор: Voltage (Напряжение)	V_m	Графический индикатор приложенного к двигателю напряжения (красный).	В

Таблица 3: Компоненты QNET ROTPENT Simple Modeling VI

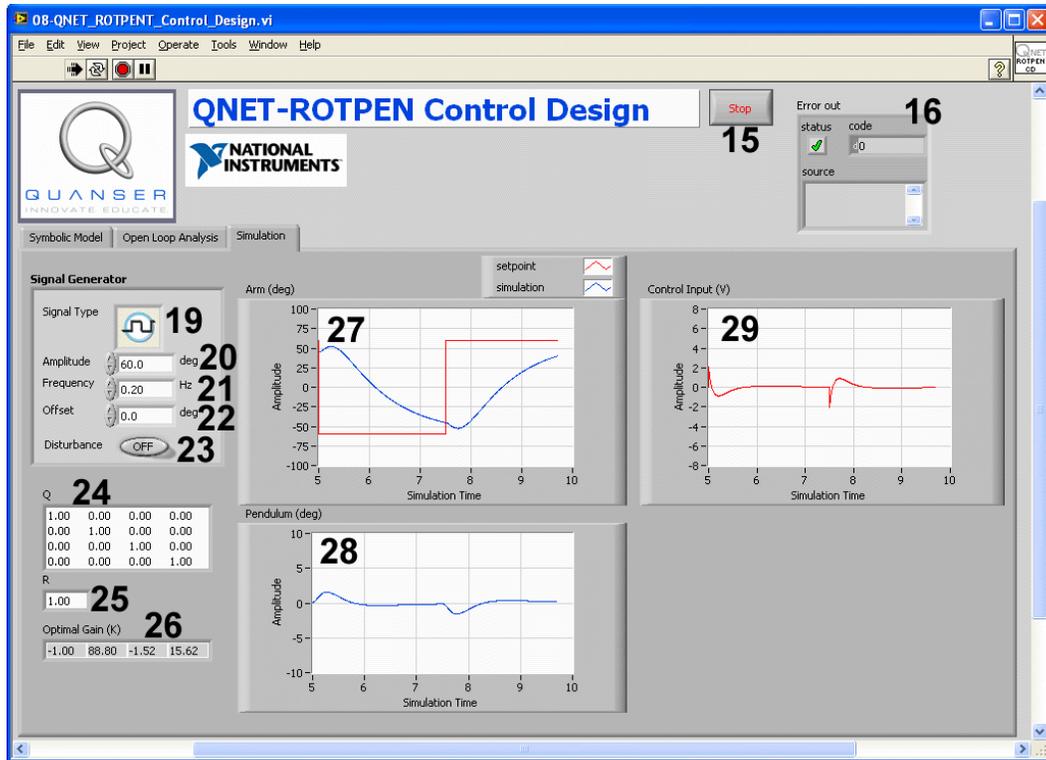


Рисунок 6.4: QNET ROTPEN Control Design VI: Зкладка *Simulation*.

Идент. номер	Метка	Обознач.	Описание	Единицы измерения
1	M_p	M_p	Масса маятника (звено + груз).	кг
2	I_p	I_p	Момент инерции центра масс маятника (звено + груз).	м
3	r	r	Расстояние от вала двигателя до оси вращения маятника.	м
4	J_p	J_p	Момент инерции маятника относительно оси вращения.	кг.м ²
5	J_{eq}	J_{eq}	Эквивалентный момент инерции, действующий на вал двигателя постоянного тока.	кг.м ²
6	B_p	B_p	Вязкое затухание относительно оси маятника.	Н.м.с/рад
7	B_{eq}	B_{eq}	Эквивалентное вязкое затухание, действующее на вал двигателя постоянного тока.	Н.м.с/рад
8	K_t	K_t	Коэффициент ток-момент вращения двигателя.	Н.м/А
9	K_m	K_m	Коэффициент противоЭДС двигателя.	В.с/рад
10	R_m	R_m	Электрическое сопротивление якоря двигателя.	Ω
11	Символьное A	A	Матрица A линейного пространства состояний вращающегося маятника.	
12	Символьное B	B	Матрица B линейного пространства состояний вращающегося маятника.	
13	Символьное C	C	Матрица C линейного пространства состояний вращающегося маятника.	
14	Символьное D	D	Матрица D линейного пространства состояний вращающегося маятника.	
15	Stop		Останов LabVIEW VI.	
16	Error Out		Отображение ошибки, возникшей в VI.	
17	Open-Loop Equation		Числовая линейная модель вращающегося маятника в пространстве состояний.	
18	Pole-Zero Map		Карта нулей и полюсов разомкнутой системы вращающегося маятника.	
19	Тип сигнала		Тип сигнала, генерируемого для опорного положения плеча.	
20	Amplitude (Амплитуда)		Поле ввода амплитуды генерируемого сигнала.	В
21	Frequency (Частота)		Поле ввода частоты генерируемого сигнала.	Гц
22	Offset (смещение)		Поле ввода смещения генерируемого сигнала.	В
23	Disturbance (Возмущение)	V_{sd}	Применение симулированного возмущающего напряжения.	В
24	Q	Q	Линейно-квадратичная матрица весов, определяющая штраф за состояние.	
25	R	R	Линейно-квадратичная матрица весов, определяющая штраф за управляющее воздействие.	
26	Optimal Gain (K) (Оптимальный коэффициент (K))	K	Коэффициент обратной связи по состоянию, рассчитанный с помощью алгоритма LQR.	
27	Arm (Плечо)	θ	Графический индикатор с опорной (синей) и измеренной (красной) характеристиками угла плеча.	градусы
28	Pendulum (маятник)	α	Графический индикатор угла инверсного маятника (синий).	градусы
29	Control Input (Управляющее воздействие)	V_m	Графический индикатор приложенного к двигателю напряжения (красный).	В

Таблица 4: Компоненты QNET ROTPENT Control Design VI:

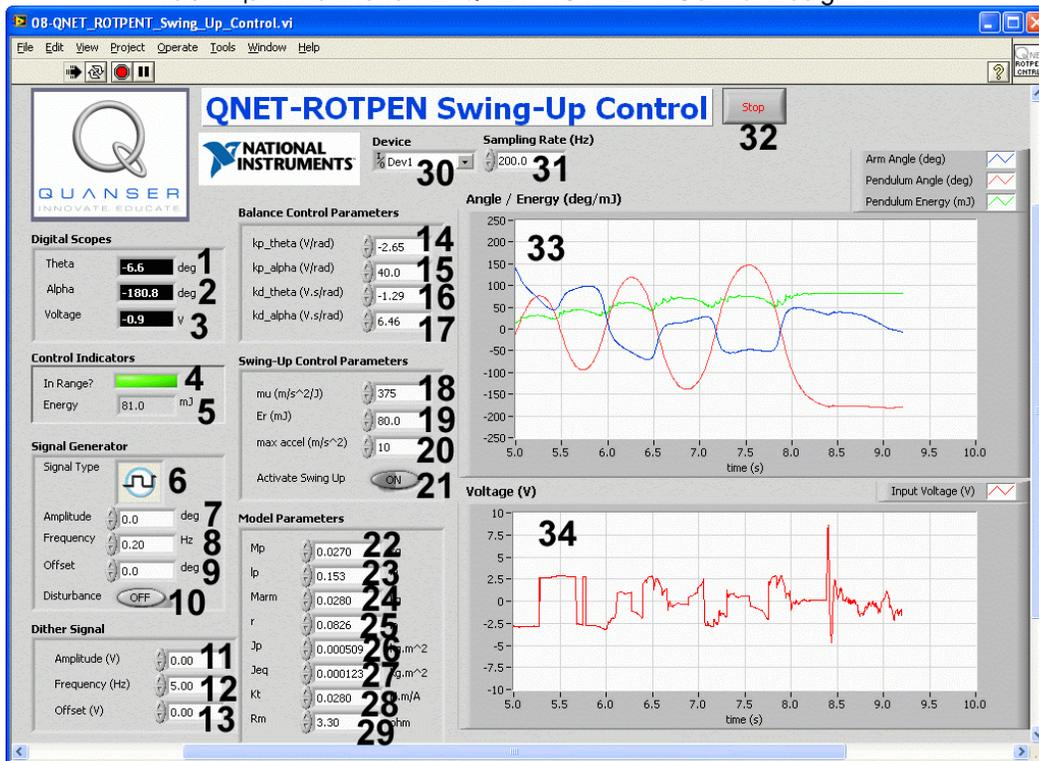


Рисунок 6.5. QNET ROTPENT Swing-Up Control VI.

Идент. номер	Метка	Обознач.	Описание	Единицы измерения
1	Theta (Тета)	θ	Числовой индикатор угла поворота плеча, измеренного энкодером на двигателе.	градусы
2	Alpha (Альфа)	α	Числовой индикатор угла поворота маятника, измеренного энкодером на оси маятника.	градусы
3	Current (Ток)	I_m	Числовой индикатор тока якоря двигателя.	А
4	In Range? (В диапазоне?)		Контроллер баланса включается, когда этот светодиод загорается зеленым цветом.	
5	Energy (Энергия)		Числовой индикатор энергии маятника.	мДж
6	Signal Type (Тип сигнала)		Тип сигнала, генерируемого для опорного сигнала плеча (например, желаемый угол поворота плеча).	
7	Amplitude (Амплитуда)		Поле ввода амплитуды опорного положения.	градусы
8	Frequency (Частота)		Поле ввода частоты опорного положения.	Гц
9	Offset (смещение)		Поле ввода смещения опорного положения.	градусы
10	Disturbance (Возмущение)	V_{sd}	Применение симулированного возмущающего напряжения.	В
11	Amplitude (Амплитуда)	A_d	Поле ввода амплитуды возмущающего сигнала.	В
12	Frequency (Частота)	f_d	Поле ввода частоты возмущающего сигнала.	Гц
13	Offset (смещение)	V_{d0}	Поле ввода смещения возмущающего сигнала.	В
14	kp_theta	$k_{p,\theta}$	Поле ввода пропорционального коэффициента для угла поворота плеча.	В/рад
15	kp_alpha	$k_{p,\alpha}$	Поле ввода пропорционального коэффициента для угла поворота маятника.	В/рад
16	kd_theta	$k_{d,\theta}$	Поле ввода дифференциального коэффициента для угла поворота плеча.	В.с/рад
17	kd_alpha	$k_{d,\alpha}$	Поле ввода дифференциального коэффициента для угла поворота маятника.	В.с/рад
18	mu	μ	Пропорциональный коэффициент контроллера управления по энергии.	м/(с ² .Дж)
19	E _r	E_r	Опорное значение энергии для контроллера управления по энергии.	мДж
20	Max accel (макс. ускорение)	U_{max}	Максимальное ускорение.	м/с ²
21	Activate Swing Up (активировать подъем)		При нажатии включается контроллер управления по энергии, поднимающий маятник.	

Таблица 5: Компоненты QNET ROTPENT Swing-Up Control VI

Идент. номер	Метка	Обознач.	Описание	Единицы измерения
22	M_p	M_p	Масса маятника (звено + груз).	кг
23	l_p	l_p	Поле ввода центра масс маятника (звено + груз).	м
24	Marm (масса плеча)	M_{ar}	Масса вращающегося плеча.	кг
25	r	$m r$	Расстояние от вала двигателя до оси вращения маятника.	м
26	J_p	J_p	Момент инерции маятника относительно оси вращения.	кг.м ²
27	J_{eq}	J_{eq}	Эквивалентный момент инерции, действующий на вал двигателя постоянного тока.	кг.м ²
28	K_t	k_t	Коэффициент ток-вращающий момент двигателя	Н.м/А
29	R_m	R_m	Электрическое сопротивление якоря двигателя.	Ω
30	Device (Устройство)		Выбор устройства NI DAQ.	
31	Sampling Rate (Частота дискретизации)		Задание частоты дискретизации VI.	Гц
32	Stop		Останов LabVIEW VI.	
33	Графики: Angle (Угол)	θ, α	Графический индикатор измеренного угла поворота плеча (красный) и угла поворота звена маятника (синий).	градусы
34	Графики: Voltage (Напряжение)	V_m	Графический индикатор приложенного к мотору напряжения (красным)	В

Таблица 5: Компоненты QNET ROTPENT Swing-Up Control VI
(продолжение)

7 ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Настоящий лабораторный практикум включает три группы экспериментов:

1. Моделирование,
2. Проектирование управления балансом
3. Реализация управления балансом
4. Управление подъемом

В каждом эксперименте руководствуйтесь шаблоном, рекомендуемым для подготовки отчета. В разделе 7.5 вы также найдете основные советы по оформлению вашего отчета.

7.1 Шаблон отчета (Простое моделирование)

I. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Затухание

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 6 раздела 2.3.

2. Трение

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 5 раздела 2.4.

3. Момент инерции

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 4 раздела 2.5.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Не интерпретируйте и не анализируйте данные в этом разделе. Просто приведите результаты.

1. Включите соответствующие данные из таблицы 1, собранные при выполнении лабораторной работы.

III. АНАЛИЗ

Предоставьте подробное описание ваших расчетов и используемых методов анализа для каждого из следующих разделов:

1. Анализа затухания для пункта 6 раздела 2.3.
2. Определение трения для пункта 5 раздела 2.4.
3. Расчета момента инерции маятника для пункта 4 раздела 2.5.

IV. ВЫВОДЫ

Интерпретируйте полученные результаты и сделайте логические выводы по вопросу:

1. Насколько хорошо экспериментально определенный момент инерции соответствует полученному аналитически в пункте 5 раздела 2.5.

7.2 Шаблон отчета (Проектирование управления балансом)

I. ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ

1. Анализ модели

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 6 раздела 3.3.

2. Проектирование системы управления и симуляции

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 6 раздела 3.4.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Не интерпретируйте и не анализируйте данные в этом разделе. Просто приведите результаты.

1. Матрицы LQR и коэффициенты системы управления, найденные для пункта 9 раздела 3.4.
2. Симулированную характеристику замкнутой системы для пункта 10 раздела 3.4.

III. АНАЛИЗ

Предоставьте подробное описание ваших расчетов и используемых методов анализа для каждого из следующих разделов:

1. Полюса разомкнутой системы для пункта 6 раздела 3.3.
2. Влияние изменения момента инерции на полюса разомкнутой системы для пункта 8 раздела 3.3.
3. Влияние изменения элементов LQR на отклик для пункта 6 раздела 3.4.
4. Влияние изменения разностного элемента LQR на отклик для пункта 8 раздела 3.4.

IV. ВЫВОДЫ

Интерпретируйте полученные результаты и сделайте логические выводы по вопросам:

1. Дало ли уменьшение инерции маятника ожидаемый эффект для пункта 8 раздела 3.3.
2. Удовлетворяют ли результаты симуляции требованиям пункта 10 раздела 3.4.

7.3 Шаблон отчета (Реализация управления балансом)

I. ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ

1. Управление балансом по умолчанию

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 8 раздела 4.3.

2. Реализация спроектированного управления балансом

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 7 раздела 4.4.

3. Управление балансом с компенсацией трения

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 4 раздела 4.5.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Не интерпретируйте и не анализируйте данные в этом разделе. Просто приведите результаты.

1. Характеристику управления балансом для пункта 7 раздела 4.4.

III. АНАЛИЗ

Предоставьте подробное описание ваших расчетов и используемых методов анализа для каждого из следующих разделов:

1. Эффект от изменения смещения для пункта 8 раздела 4.3.
2. Анализ управления балансом для пункта 9 раздела 4.3.
3. Анализ управления балансом при отслеживании ступеньки опорного сигнала для пункта 11 раздела 4.3.
4. Исследование колебаний плеча для пункта 4 раздела 4.5.
5. Объясните, для чего нужен возмущающий сигнал в пункте 6 раздела 4.5.
6. Эффект от увеличения частоты возмущающего сигнала в пункте 8 раздела 4.5.

IV. ВЫВОДЫ

Интерпретируйте полученные результаты и сделайте логические выводы по вопросам:

1. Удовлетворяет ли контроллер баланса требованиям пункта 7 раздела 4.4.
2. Эффект от задания возмущающего сигнала на определяемые параметры трения в пункте 9 раздела 4.5.

7.4 Шаблон отчета (Управление подъемом)

I. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Управление энергией

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 7 раздела 5.3.

2. Гибридное управление колебаниями

- Кратко опишите основную цель эксперимента.
- Кратко опишите порядок выполнения эксперимента для пункта 9 раздела 5.4.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ

Не интерпретируйте и не анализируйте данные в этом разделе. Просто приведите результаты.

1. Отклик маятника для пункта 11 раздела 3.4.

III. АНАЛИЗ

Предоставьте подробное описание ваших расчетов и используемых методов анализа для каждого из следующих разделов:

1. Энергия в различных положениях маятника для пункта 7 раздела 5.3.
2. Эффект от изменения опорной энергии для пункта 11 раздела 5.3.
3. Эффект от изменения пропорционального коэффициента для пункта 11 раздела 5.3.

IV. ВЫВОДЫ

Интерпретируйте полученные результаты и сделайте логические выводы по вопросу:

1. Опорная энергия, требуемая для подъема маятника в пункте 10 раздела 5.4.

7.5 Советы по оформлению отчета

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ВНЕШНИЙ ВИД

- Наличие титульной страницы со всеми необходимыми деталями (Название работы, курс, имя и фамилия студента (-ов) и т.п.)
- Наличие всех требуемых разделов (Выполнение работы, Результаты, Анализ и Выводы).
- Отчет должен быть напечатан.
- Отсутствие орфографических и грамматических ошибок.
- Аккуратное оформление отчета.
- Не превышено максимально количество страниц, если оно ограничено.
- Страницы пронумерованы.
- Уравнения последовательно пронумерованы.
- Рисунки пронумерованы, у осей имеются обозначения, у каждого рисунка имеется смысловая подпись.
- Таблицы пронумерованы, включают обозначения, у каждой таблицы имеется смысловая подпись.
- Данные представлены в удобном формате (графики, числовые значения, таблицы, схемы, диаграммы).
- Отсутствуют схемы и диаграммы, нарисованные вручную.
- Ссылки приведены в соответствии с правилами оформления.

ССЫЛКИ

[1] Quanser Inc. *QNET Rotary Pendulum Control Trainer User Manual*, 2011.

Шесть тренажеров QNET для обучения основам управления с помощью NI ELVIS

▶ QNET DC Motor Control Trainer

Изучение основ управления двигателем постоянного тока



▶ QNET HVAC Trainer

Изучение принципов регулирования температуры



▶ QNET Mechatronic Sensors Trainer

Изучение принципа действия 10 различных датчиков



▶ QNET Rotary Inverted Pendulum Trainer

Классические эксперименты по управлению маятником



▶ QNET Myoelectric Trainer

Управление с использованием принципов электромиографии (ЭМГ)



▶ QNET VTOL Trainer

Изучение основ динамики и управления полетами



▶ NI ELVIS I



▶ NI ELVIS II



Тренажеры Quanser QNET - встраиваемые в NI ELVIS платы для обучения основам управления студентов старших курсов. Вместе они предоставляют вариативные и экономичные решения для организации обучения преподавателями инженерных специальностей. Все шесть тренажеров QNET поставляются с соответствующими стандартам ABET исчерпывающими материалами курсов, разработанных для углубления практического опыта студентов.

Для запроса демонстрации или предложения по цене, пожалуйста, обратитесь по адресу info@ni.com.

©2012 Quanser Inc. All rights reserved. LabVIEW™ является торговой маркой National Instruments.

[INFO@NI.COM](mailto:info@ni.com)

[INFO@QUANSER.COM](mailto:info@quanser.com)

Решения Quanser для обучения и исследования изготовлены в Канаде.