

УДК 004.415.2, 004.588

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМ ДИНАМИЧЕСКИ
НЕУСТОЙЧИВЫМ ОБЪЕКТОМ «КАРЕТКА-ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК».
Ч. 1: ТЕХНОЛОГИЯ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Нефёдов Никита Юрьевич¹, Решетников Андрей Геннадьевич²,
Ульянов Сергей Викторович³**

¹Студент;

ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: nefnuket@gmail.com.

²Студент;

ГБОУ ВПО «Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: reshetnikovag@pochta.ru.

³Доктор физико-математических наук, профессор;

ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

В статье рассматриваются методы интеллектуального управления различными способами (ПИД-регулятор, подбор коэффициентов в режиме он-лайн с помощью генетического алгоритма, с помощью нечеткой базы знаний, созданной в оптимизаторе баз знаний) на макете объекта «каретка-перевернутый маятник». Приведена схема сборки и список составляющих для макета.

Ключевые слова: управление неустойчивым объектом, интеллектуальное управление, верификация объекта управления, мягкие вычисления, оптимизатор баз знаний, ПИД-регулятор, система автоматического управления, нечеткая база знаний.

**INTELLIGENT CONTROL OF DYNAMIC UNSTABLE PHYSICAL OBJECT «CART-
POLE». PT. 1: SOFT COMPUTING TECHNOLOGY**

Nefedov Nikita¹, Reshetnikov Andrey², Ulyanov Sergey³

¹Student;

Dubna International University of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: nefnuket@gmail.com.

³Student;

Dubna International University of Nature, Society and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: reshetnikovag@pochta.ru.

¹Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

This article describes intelligent control methods of dynamically unstable object (PID-controller, genetic algorithm on-line, fuzzy knowledge base created by soft-computing optimizer) based on model of dynamic unstable object «cart – pole». The circuit assembly and list of the components for model has shown.

Keywords: control of unstable dynamic object, soft computing optimizer, intelligent control, verification of the control object, soft computing, PID-controller, automatic control system, fuzzy knowledge base.

Введение

Управление неустойчивым динамическим объектом «каретка – перевернутый маятник» является одной из типовых задач в теории управления, т.к. решение этой задачи наглядно демонстрирует качество системы автоматического управления (САУ).

Задача управления состоит в том, чтобы, воздействуя с помощью силы управления на тележку, держать свободно закрепленный на ней маятник в вертикальном положении (угол маятника равен 0) в любых условиях изменения среды функционирования.

Математическая модель системы

Динамическое поведение этого объекта управления (ОУ) (рис. 1) описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка для вычисления силы, используемой для движения каретки:

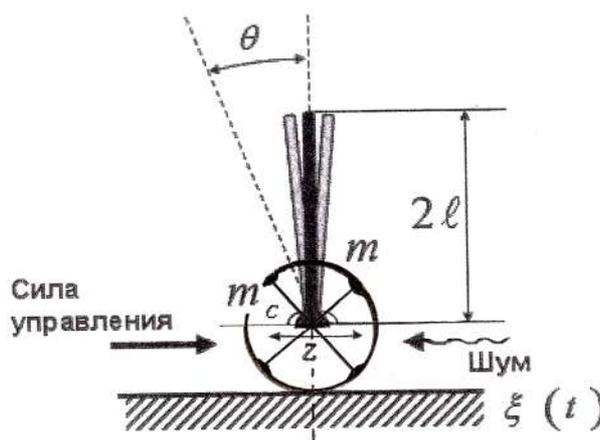


Рис. 1. Динамическая система «каретка с перевернутым маятником»

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{u + \xi(t) + a_1 \dot{z} + a_2 z - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k\dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)} \\ \ddot{z} = \frac{u + \xi(t) - a_1 \dot{z} - a_2 z + ml(\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta)}{m_c + m} \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) z и θ – обобщенные координаты; g – ускорение свободного падения ($9,8 \text{ м/сек}^2$), m_c – масса тележки, m – масса перевернутого маятника (называемого «шест»), l – половина длины маятник, k и a_1 – коэффициенты трения по направлению координат z и θ , соответственно, a_2 – сила упругости, препятствующая перемещению тележки, $\xi(t)$ – внешний стохастический шум, а u – сила управления.

Структура системы автоматического управления для ОУ

САУ для объекта «каретка с перевернутым маятником» показана на рис. 2.

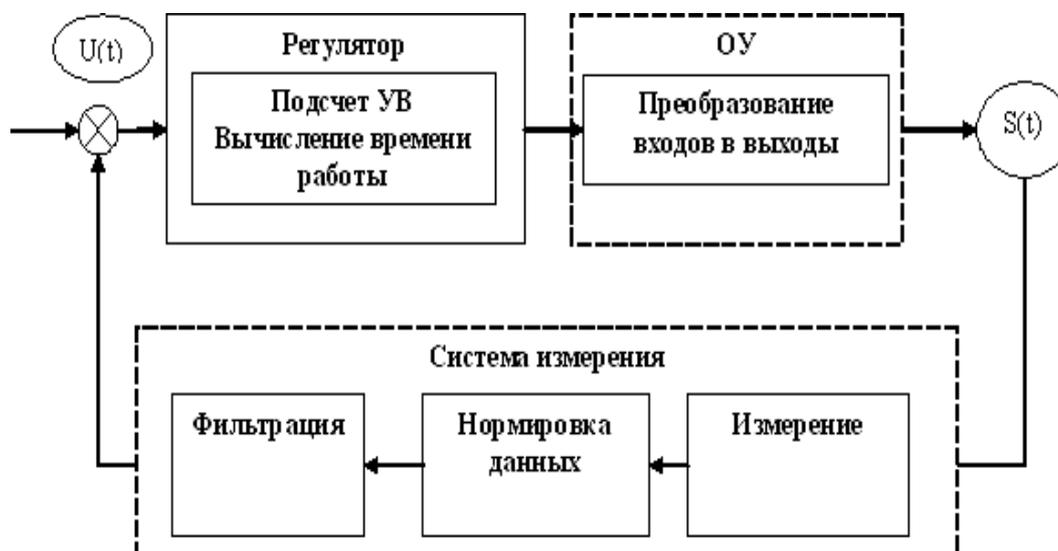


Рис. 2. Структура САУ для объекта «каретка с перевернутым маятником» (УВ – управляющее воздействие)

Данная структура отражает работу системы управления с обратной связью.

Рассмотрим более детально каждый блок схемы. Система измерения несколько раз считывает данные с датчиков. Количество считываний зависит от скорости работы процессора и чувствительности датчиков. В задаче управления важную роль играет получение достоверных данных о мгновенном состоянии системы. Для повышения точности измерения о состоянии объекта полученные данные считываются несколько раз, а затем усредняются по формуле (2):

$$ActualValue = \frac{\sum_{i=1}^m S}{m}, \quad (2)$$

где m – количество произведенных замеров, S – показания датчиков.

На следующем этапе происходит нормировка данных. Этот процесс преобразует данные датчиков к единой измерительной системе единиц.

Далее применяется фильтр Калмана [1]. Фильтрация обеспечивает логическую часть программы достоверными данными, используемыми для подсчета скорости изменения ошибки и интеграла ошибки.

Динамика этих показателей приведена на рис. 3.

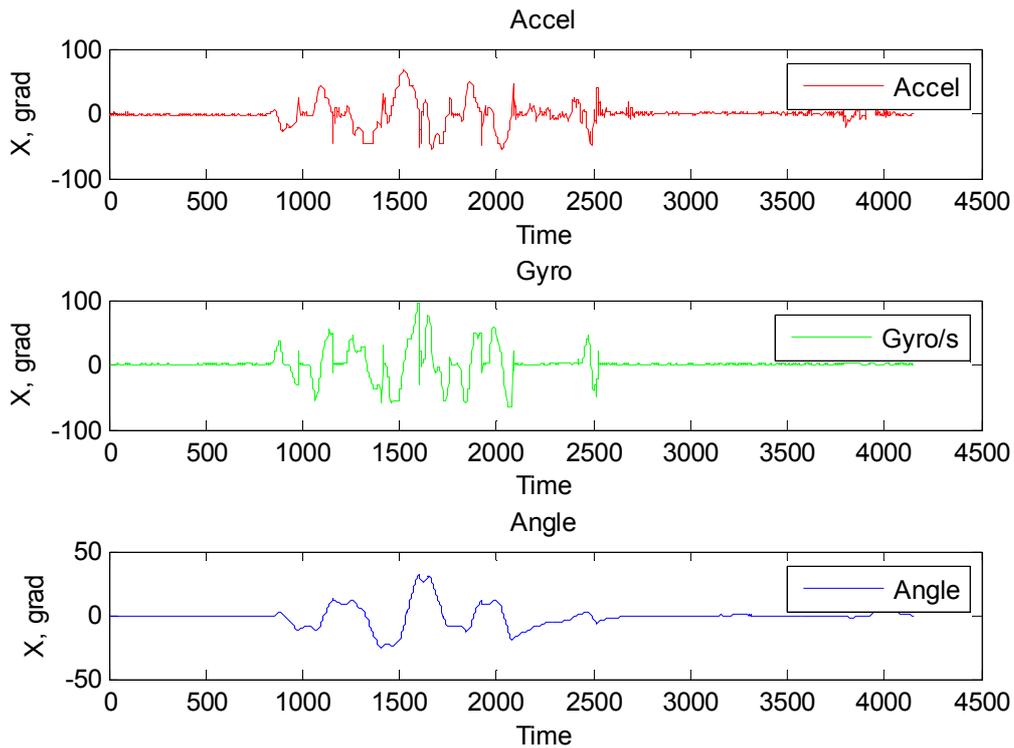


Рис. 3. Данные сенсоров и данные после применения фильтра Калмана

Используя полученные значения, алгоритм выполняет подсчет УВ на основе формулы для ПИД-регулятора (3):

$$u(t) = k_p e + k_d \dot{e} + k_i \int e dt. \tag{3}$$

Регулятор, использующий широтно-импульсную модуляцию, формирует УВ, которое подается на драйвер двигателей. Драйвер для двигателя выполняет задачу ограничения скорости и направления вращения колес.

Примечание. Основная функция регулятора – выработать УВ на ОУ. Величина длительности такта для подачи УВ должна быть одинакова и задается экспертом. Обычно в качестве этой величины принимается значение частоты самого медленного устройства в системе, в данном макете это драйвер двигателей, его частота – 10 МГц. Поэтому, если система выполняет свои функции быстрее, чем 10 МГц, то контроллер задерживает работу системы на разность между эталонной длительностью такта и длительностью текущего такта.

Реализация модели в Matlab

Структура компьютерной модели перевернутого маятника на основе ПИД-регулятора, разработанная в среде *Matlab/Simulink*, представлена на рис. 4.

Данная система включает в себя шумы в системах управления и измерения.

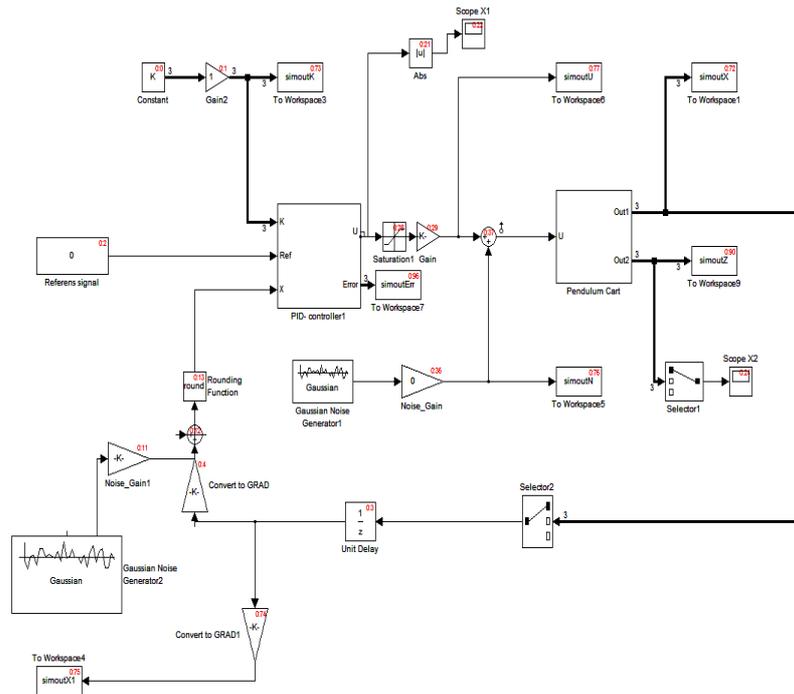


Рис. 4. Структура Matlab-модели САУ с ПИД-регулятором

Данная система позволяет производить поиск коэффициентов ПИД-регулятора без запуска на макете. Но прежде чем приступить к поиску коэффициентов, необходимо верифицировать модель.

Верификация модели

Для верификации модели требуется знать параметры модели. Часто на практике определить некоторые из них не представляется возможным, поэтому эксперту приходится подбирать эти параметры вручную. В таблице 1 представлена классификация параметров, часть из которых была определена точно, а также набор параметров, которые вычислить с достаточной точностью не удалось.

Таблица 1. Параметры модели

Определенные	Недоопределенные
Масса маятника	Трение оси
Масса тележки	Коэффициент упругости
Длина маятника (центр тяж.)	Люфт оси
Ограничения на УВ	Коэффициент воздействия (нормирующий)
Время такта системы	Шум измерительной системы
ПИД-коэффициенты	Трение колес
Входные и выходные данные регулятора технического изделия (2 тыс. точек).	

Задачу поиска значений недоопределенных параметров можно решить с использованием описанного ниже метода на основе генетического алгоритма (ГА).

ГА может подобрать параметры модели таким образом, чтобы выходы с макета совпадали с выходными значениями, полученными при моделировании в *Matlab*.

Время моделирования в *Matlab* устанавливается равным времени работы макета. В качестве функции пригодности использовалась разность между дисперсиями выборок *Matlab*-модели и макета (4):

$$Fitness = (Variance_{Real} - Variance_{Model})^2 + T, \quad (4)$$

где T – время моделирования (размер выборки).

Используя данную функцию пригодности, можно достичь адекватных параметров модели. Теперь, применяя знания эксперта или ГА, можно подобрать ПИД-коэффициенты для модели. Будем использовать ГА, и в результате получим рабочие ПИД-коэффициенты.

После определения коэффициентов тестируем их на макете. Если результат не удовлетворительный, то повторяем предыдущие этапы, начиная с верификации модели. В случае повторной неудачи следует, если это возможно, уменьшить количество недоопределенных параметров путем фиксации одного или нескольких из них в математической модели. Схема верификации математической модели представлена на рис. 5.

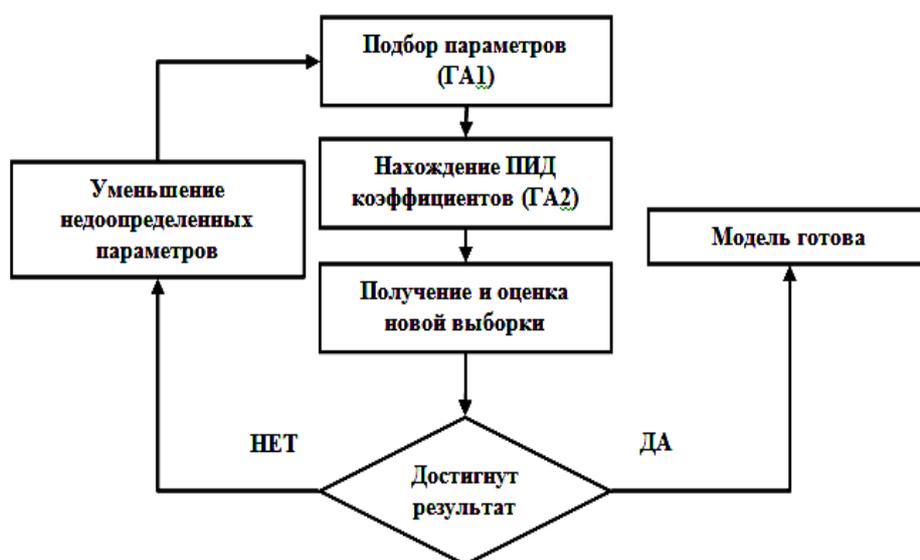


Рис. 5. Логическая схема процесса верификации с использованием ГА

Реализация генетического алгоритма в режиме реального времени

Существуют различные способы настройки регуляторов во времени. Обычно настройка регуляторов сопровождается большим количеством экспериментов и множеством сложностей. В систему автоматического управления (САУ) необходимо добавить блоки настройки или адаптации, способные выполнять функции эксперта. Адаптация – это способность технических устройств или систем приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды или к внутренним изменениям своей структуры, что приводит к повышению эффективности их функционирования. В повседневной жизни мы можем наблюдать адаптацию в естественной среде. Например, поворот листьев растений с целью получения большего количества солнечной энергии, необходимой для фотосинтеза.

Наша задача проектирования – создать такую искусственную адаптивную систему управления, которая в процессе функционирования приспосабливается к изменениям внешних и внутренних условий, изменяя свои параметры или структуру с целью улучшения качества управления.

Один из способов – реализовать настройку регулятора во времени, добавив в систему алгоритм поиска решения, сделать поиск случайным. Случайно полученные коэффициенты подставить в ПИД-регулятор. Если решение будет лучше, чем при предыдущих коэффициентах, то продолжить работу с данными коэффициентами, если решения окажутся хуже, то вернуться к предыдущим решениям.

Однако такой алгоритм для управления динамически неустойчивым объектом не подходит, т.к. его использование может перевести ОУ в необратимое состояние. Можно добавить к этому контуру управления внешнюю систему управления, способную в непредвиденных, неуправляемых и нестабильных ситуациях приводить систему в устойчивое состояние, однако скорость поиска решений, способных эффективно управлять, остается величиной вероятностной и зависит от пространства поиска коэффициентов управления.

В общем виде схема алгоритма САУ с системой адаптации выглядит следующим образом (рис. 6).

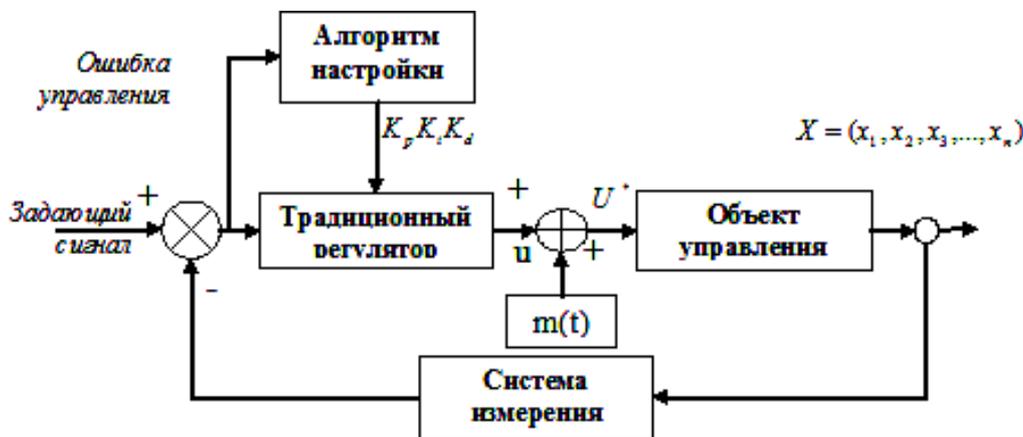


Рис. 6. Общая схема алгоритма адаптации

Мы используем в качестве алгоритма настройки ГА. Очевидно, что такой алгоритм автономного адаптивного управления не является оптимальным с точки зрения использования ресурсов бортовой вычислительной системы – объема памяти и процессорного времени.

Начальная популяция ГА может быть получена случайным образом или путем экспертной оценки предварительно проведенных экспериментов. Применительно к ПИД-регулятору каждое решение представляет значения коэффициентов усиления, сложенных в одну хромосому. Так как операции скрещивания и мутации работают с закодированными параметрами, то коэффициенты кодируются в бинарную форму с заданной точностью, соответствующей длине бинарной строки. Также определяются диапазоны поиска коэффициентов.

Для поставленной задачи управления был разработан алгоритм управления и определена следующая функция пригодности хромосом – квадрат интегральной ошибки управления (5).

$$f(x) = \frac{1}{1 + \int e^2 dt} \tag{5}$$

В этом случае большие значения функции пригодности соответствуют малым значениям ошибки управления, следовательно, лучшему качеству управления ПИД-регулятора. Диапазон интегрирования – это время работы одного решения (для каждого решения это время одинаковое). Следует уделить особое внимание времени оценки решения и выбрать его, исходя из динамических и информационных свойств работы регулятора и системы в целом.

Схема работы ГА показана на рис. 7.

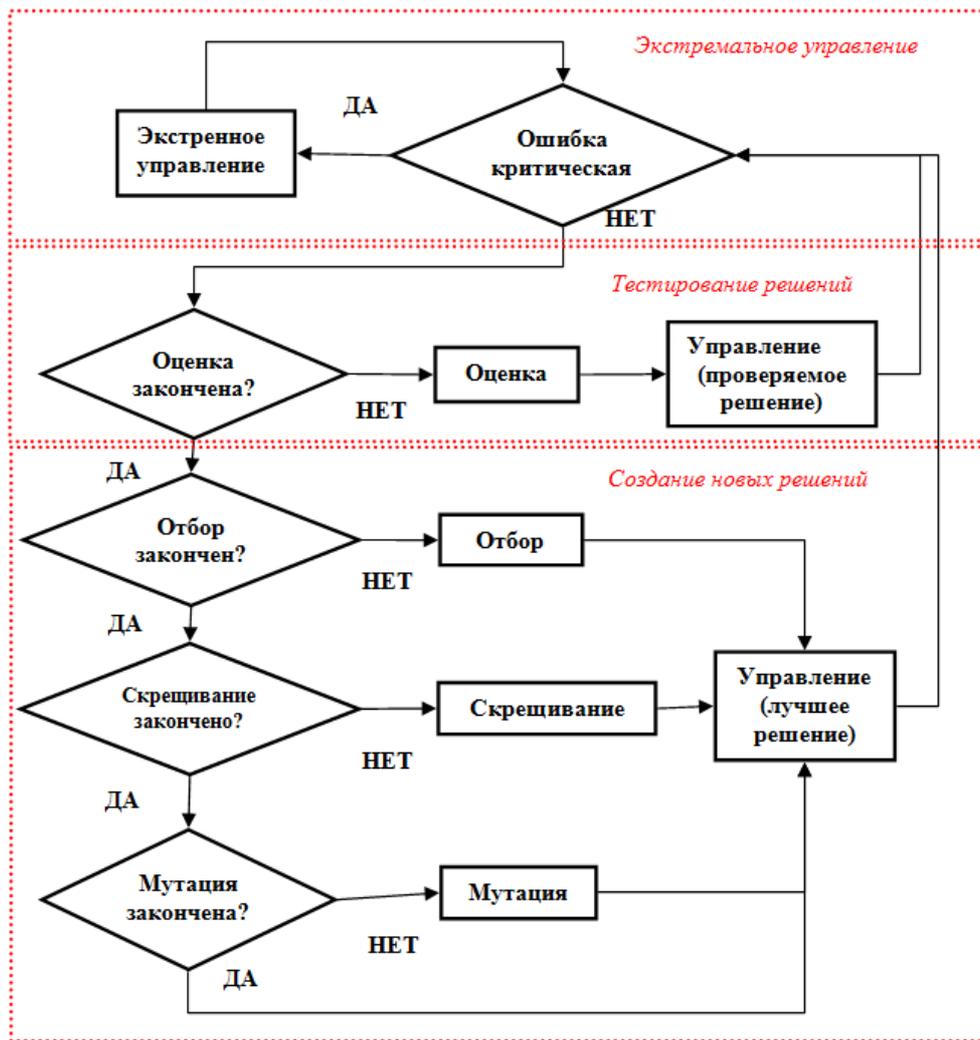


Рис. 7. Схема работы ГА

Можно использовать и другую функцию пригодности, например, для многокритериальной оценки использовать комплексную величину, состоящую из суммы различных критериев качества работы системы. Например (6):

$$fit(P) = \frac{1}{1 + (ae + b \int edt + ce)^2}, \quad a + b + c = 1. \quad (6)$$

Здесь коэффициенты a, b, c могут иметь разные весовые значения для каждой ошибки. Каждый коэффициент усиления оценивается отдельной функцией пригодности.

Преимущество ГА по сравнению с другими методами поиска экстремума заключается в том, что не нужно вычислять производную для искомой функции.

После каждой итерации выбирается лучшее решение, что позволяет ГА продолжать работу, не потеряв управления над маятником.

Включение экстремного управления осуществляется в момент увеличения ошибки управления до определенного порога. Значения коэффициентов усиления ПИД-регулятора задаются экспертом, исходя из динамического поведения ОУ.

Во время селекции, скрещивания и мутации процессорное время занято обработкой решений, а УВ подсчитывается при лучших коэффициентах K_p, K_i, K_d . Графики работы такой системы представлены на рис. 8.

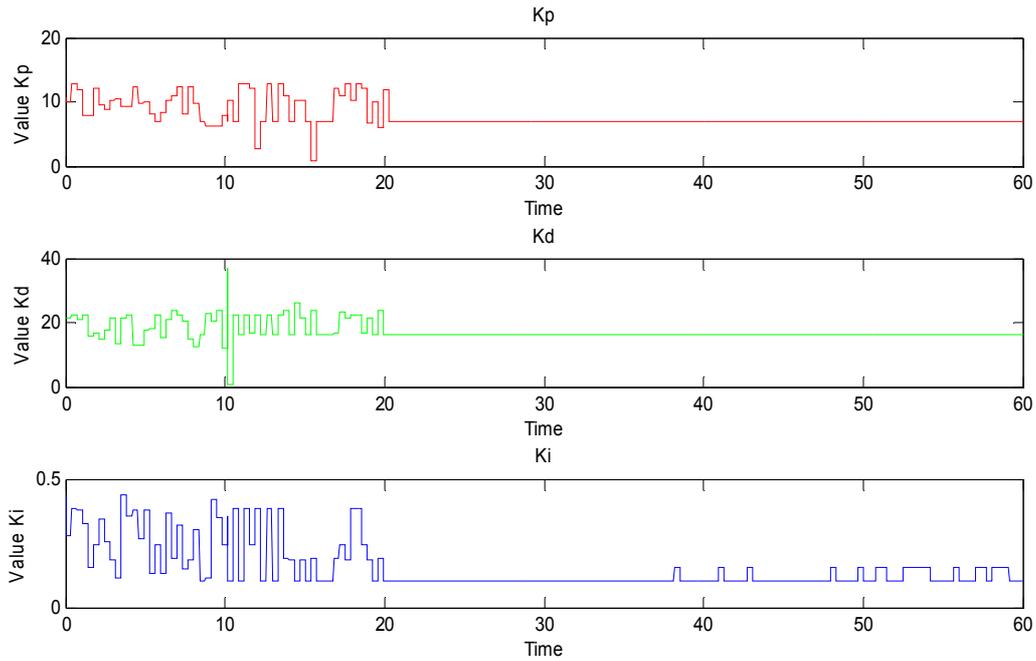


Рис. 8. Сходимость коэффициентов ПИД-регулятора в процессе работы модели

Проектирование нечеткого регулятора в ОБЗ

Часто основным элементом ИСУ является нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него базы знаний (БЗ), включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

На рис. 9 изображена структура ИСУ, где $x(t)$ – вектор состояния объекта управления (ОУ), x_d – «задающий сигнал» (цель управления), $e(t)$ – ошибка управления, вычисляемая как разность состояния ОУ и задающего сигнала: $e(t) = x_d - x(t)$. На вход НР подается вектор ошибки управления: ошибка управления $e(t)$, интегральная ошибка управления $ie = \int edt$ и производная ошибки управления $\dot{e}(t)$.

Структура нечеткого регулятора представлена на рис. 9.

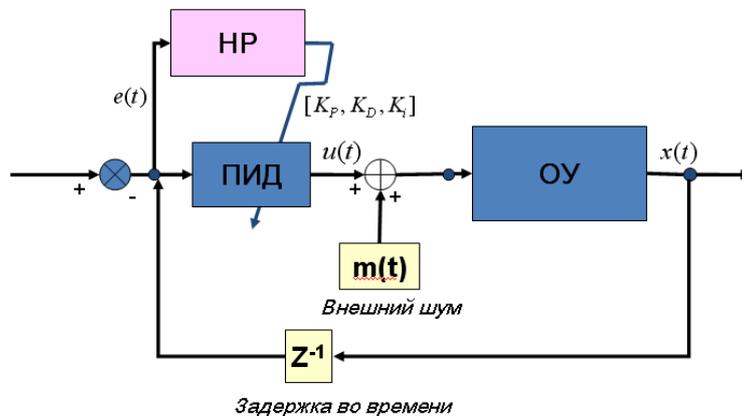


Рис. 9. Структура ИСУ

Выходом НР является вектор значений коэффициентов усиления, которые поступают в ПИД-регулятор для формирования управляющего воздействия (7):

$$u(t) = K_p(t)e(t) + K_I(t) \int_0^t e dt + K_D(t)\dot{e}(t). \quad (7)$$

В процессе работы были получены две БЗ:

- на основе обучающего сигнала с *Matlab*-модели;
- на основе сигнала, полученного с физического макета.

В таблице 2 приведены характеристики полученных с помощью ОБЗ баз знаний

Таблица 2. Характеристики баз знаний, полученных с помощью ОБЗ

Характеристика	БЗ1	БЗ2
Модель нечеткого вывода	Сугено	Сугено
Вид функций принадлежности	Треугольный	Треугольный
Количество функций принадлежности входных переменных	[3 3 3]	[3 3 5]
Количество правил	8 из 27	15 из 45

В следующем разделе приведены результаты моделирования работы рассмотренных систем управления.

Результаты проведения эксперимента на макете

Проведем эксперимент на макете и в *Matlab/Simulink* в ситуациях, когда управление осуществляется с помощью:

ПИД-коэффициентов, подобранных экспертом;

ПИД-коэффициентов, подобранных с помощью ГА;

ГА-регулятора;

Базы знаний, созданной в ОБЗ (обучающий сигнал получен на *Matlab*-модели);

Базы знаний, созданной в ОБЗ (обучающий сигнал получен на физической модели).

Работа *Matlab*-модели и макета при ПИД-коэффициентах, подобранных экспертом

Модель *Matlab*

Рассмотрим работу *Matlab*-модели и сравним с работой физической модели.

На графике (рис. 10) показано изменение угла маятника во времени. Подобранные коэффициенты работают – маятник не падает.

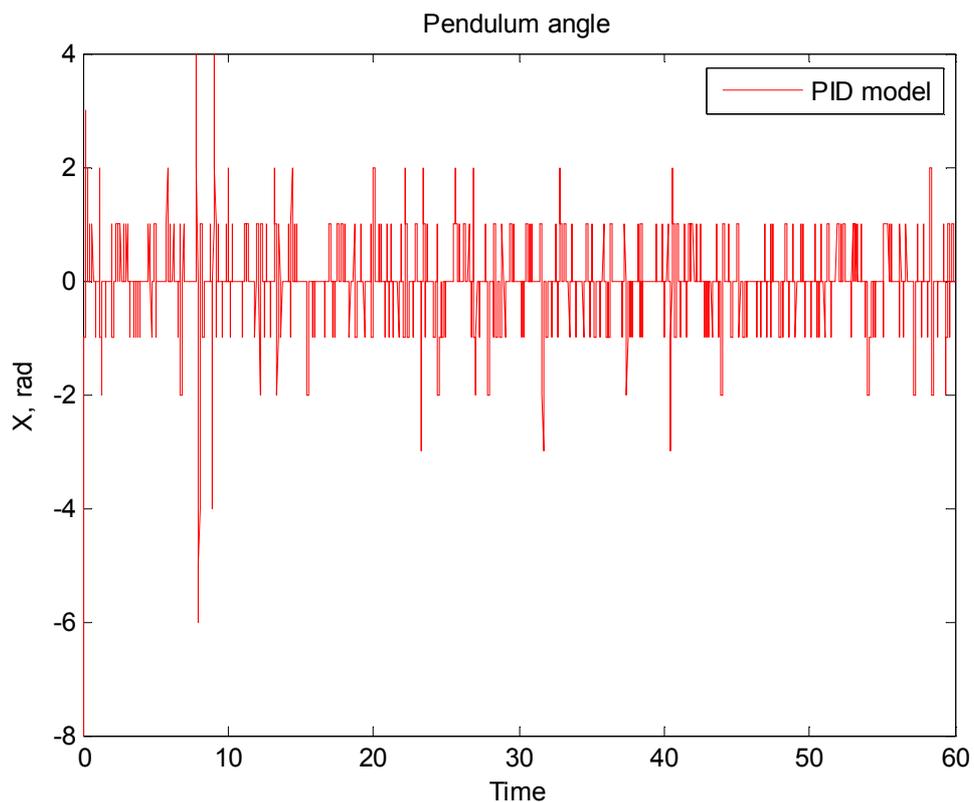


Рис. 10. Динамика изменения угла маятника

На следующем графике можно видеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 11).

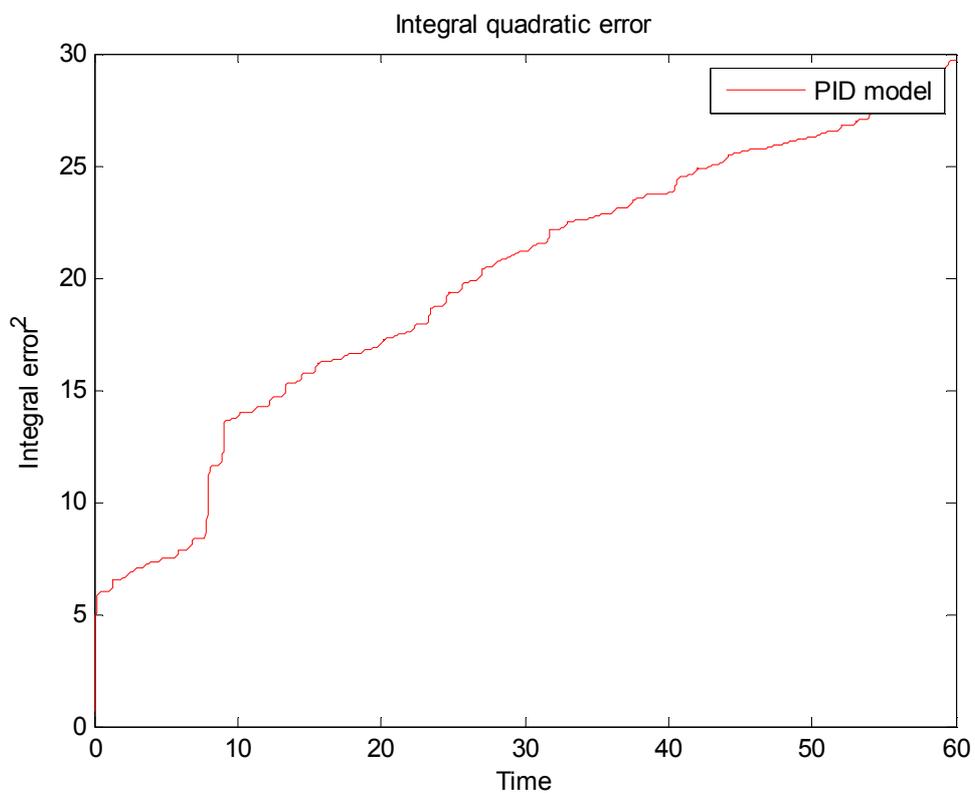


Рис. 11. Квадратичная интегральная ошибка управления

Физическая модель

Подставим ПИД-коэффициенты в физическую модель.

Изменение динамики угла маятника (рис. 12).

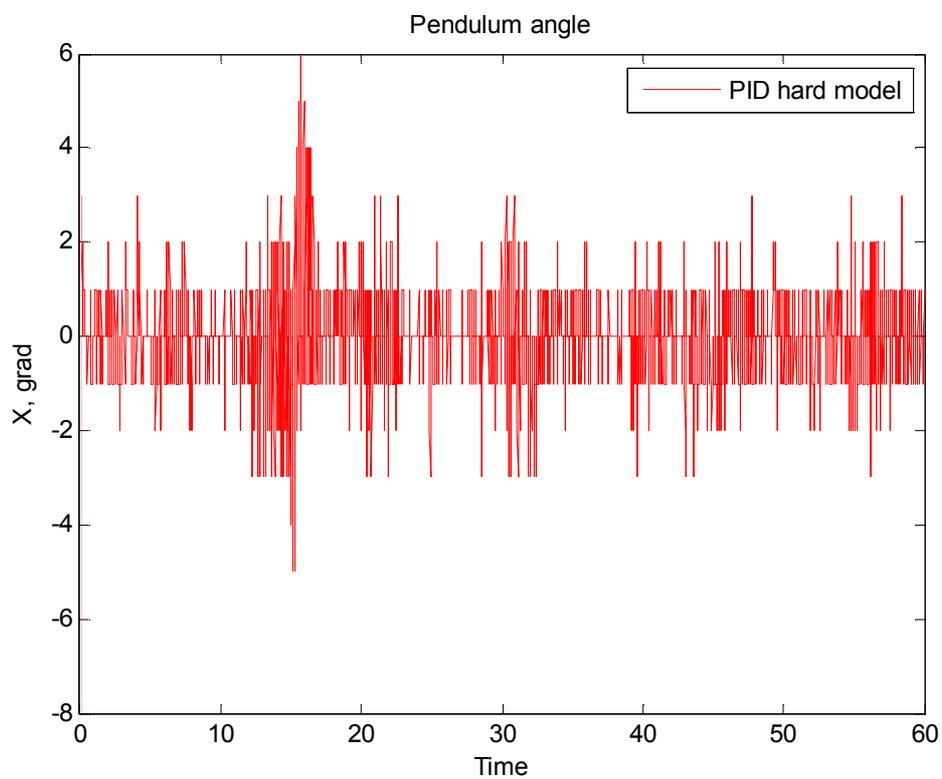


Рис. 12. Динамика изменения угла маятника

На графике можно видеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 13).

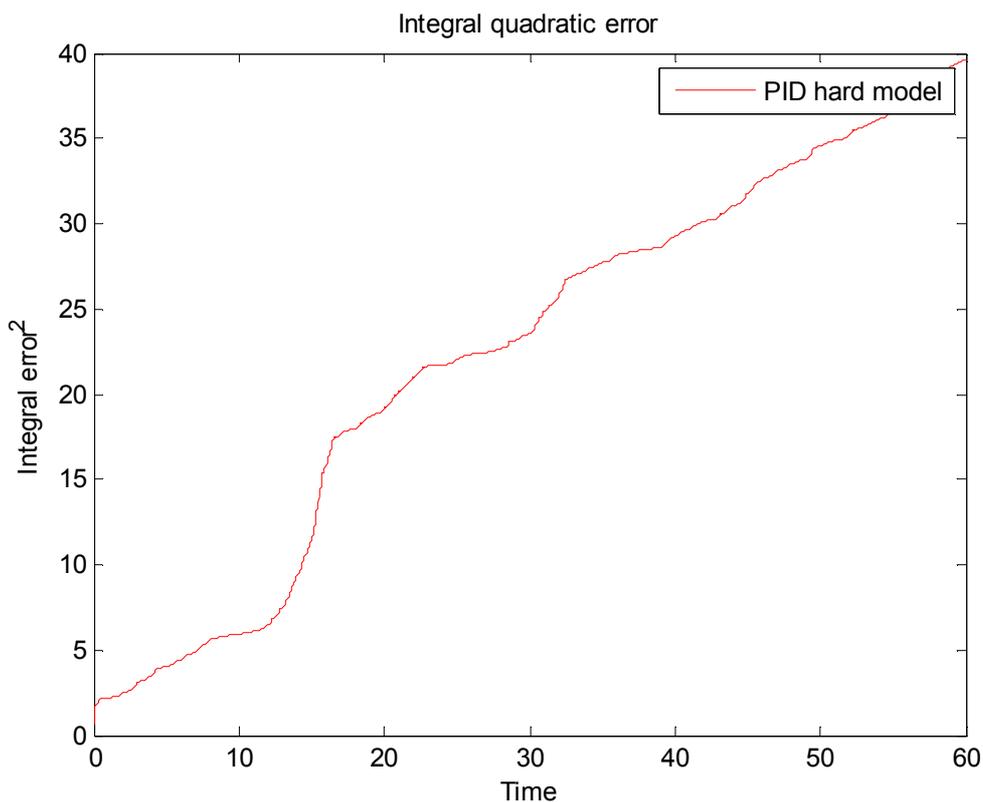


Рис. 13. Квадратичная интегральная ошибка управления

Графики работы на *Matlab*-модели и на физической модели получились схожими, что подтверждает успешно проведенную верификацию математической модели.

Из результатов, представленных на рисунках, видно, что цель управления достигнута.

Работа базы, созданной в ОБЗ (обучающий сигнал с Matlab-модели)

Рассмотрим теперь работу базы знаний. Обучающий сигнал, который был получен при помощи ОБЗ. Количество входных функций принадлежности для входных переменных $\{3, 3, 3\}$. 9 правил.

Модель Matlab

На графике (рис. 14) показано изменение угла маятника во времени. Управление на основе базы знаний справляется с целью управления – маятник не падает.

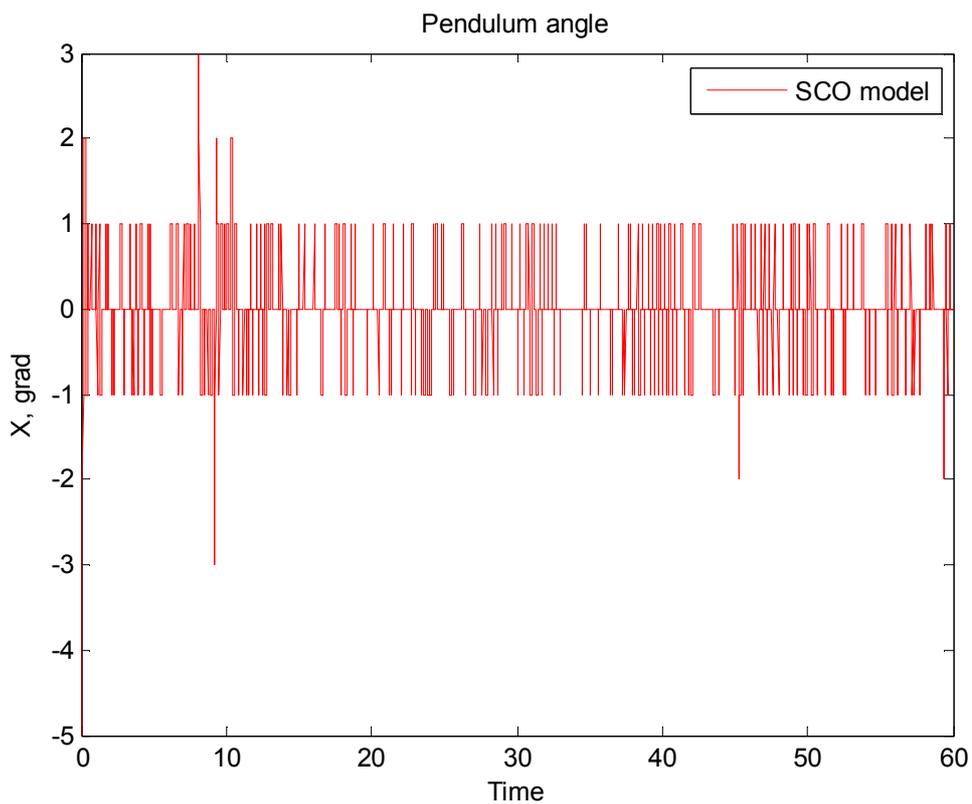


Рис. 14. Динамика изменения угла маятника

На графике можно видеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 15).

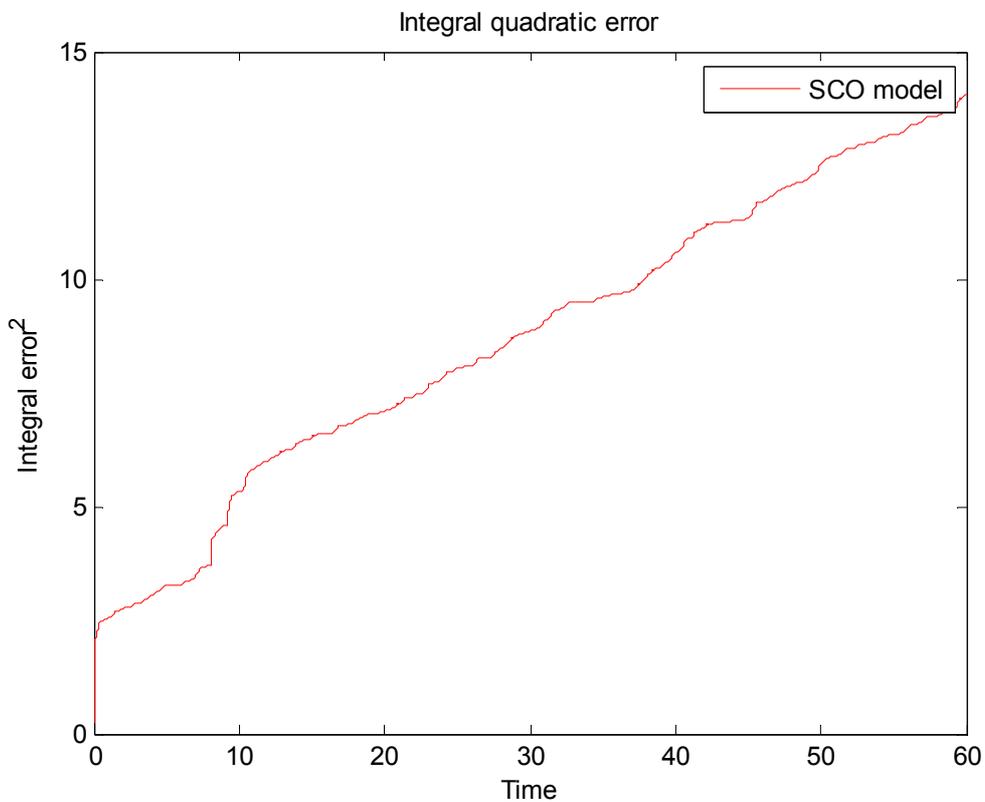


Рис. 15. Квадратичная интегральная ошибка управления

На следующем графике можно видеть изменение закона управления (рис. 16).

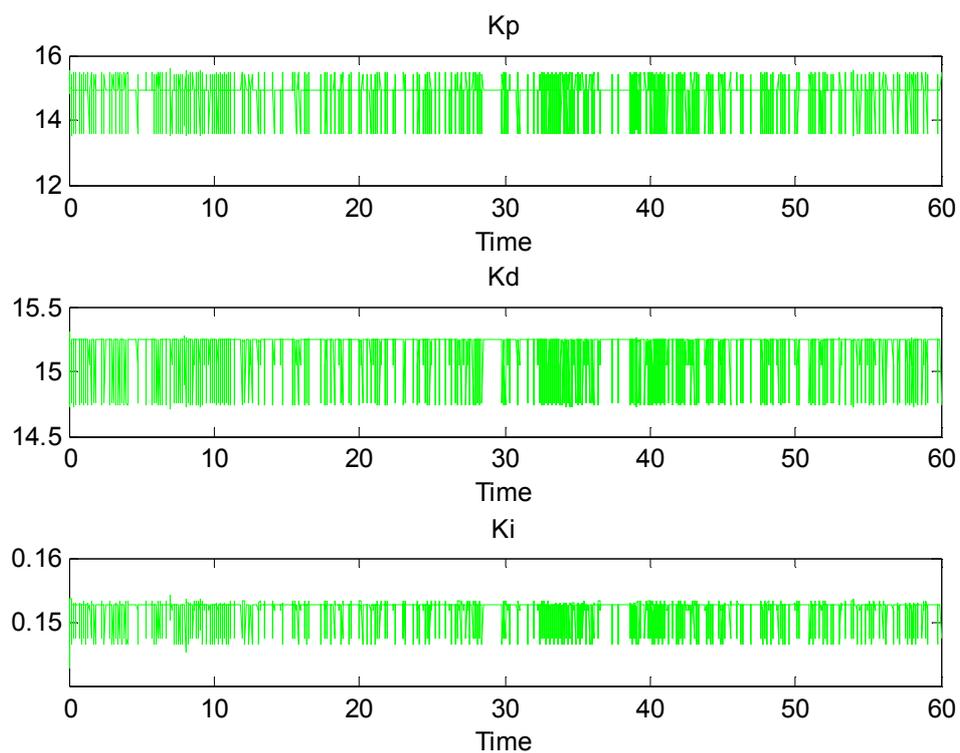


Рис. 16. Изменение закона управления

Эта модель справляется с целью управления лучше: ошибка управления меньше, чем при управлении при помощи ПИД-регулятора.

Физическая модель

Рассмотрим работу физической модели. Изменение динамики угла маятника (рис. 17).

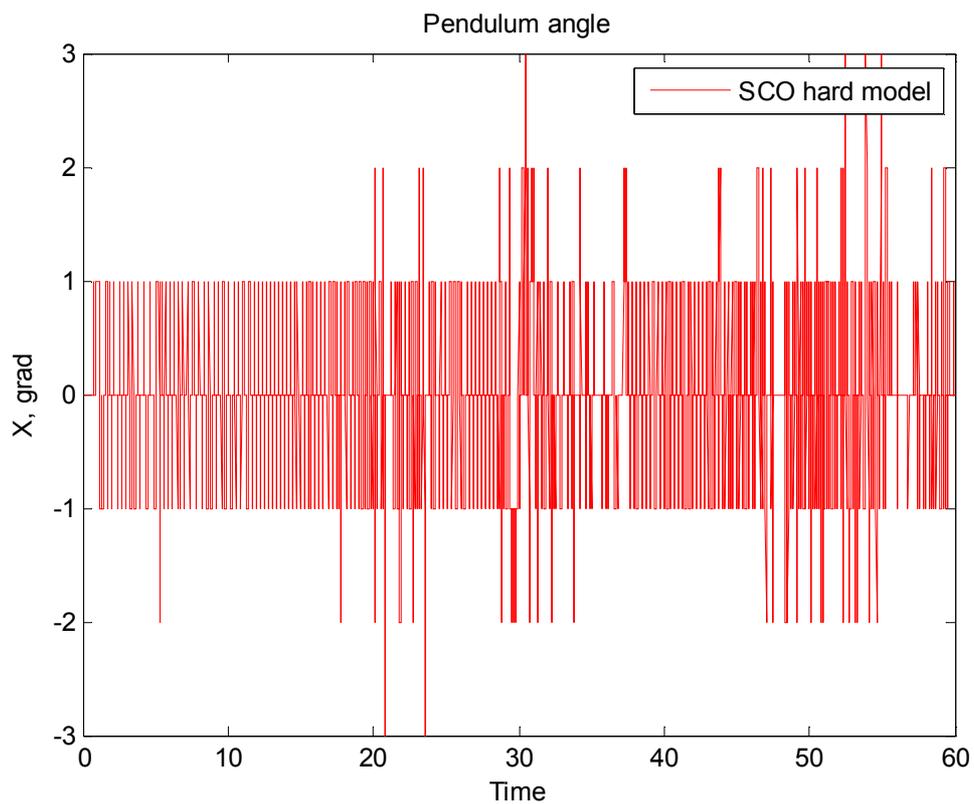


Рис. 17. Динамика изменения угла маятника

На графике можно увидеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 18).

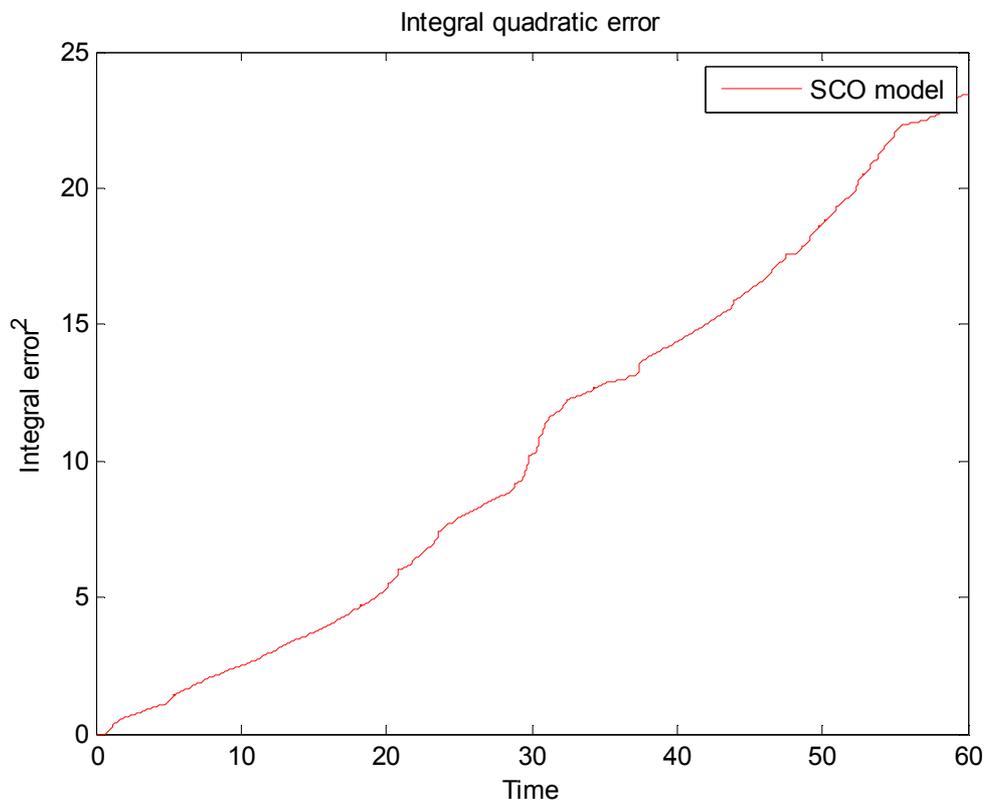


Рис. 18. Квадратичная интегральная ошибка управления

На следующем графике можно видеть изменение закона управления (рис. 19).

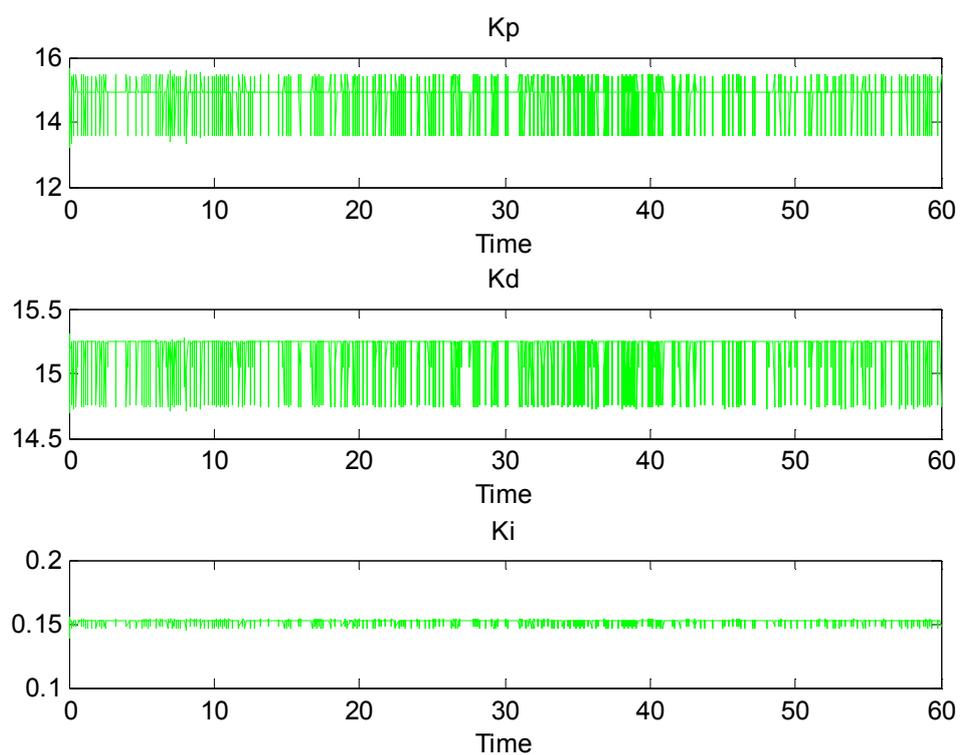


Рис. 19. Изменение закона управления

Результаты моделирования и на *Matlab*-модели и на физическом ОУ показали, что с помощью базы знаний, созданной в ОБЗ, маятник управляется намного лучше (ошибка управления меньше, чем у ПИД-управления).

ПИД-коэффициенты, подобранные с помощью ГА

Модель Matlab

На графике (рис. 20) показано изменение угла маятника во времени.

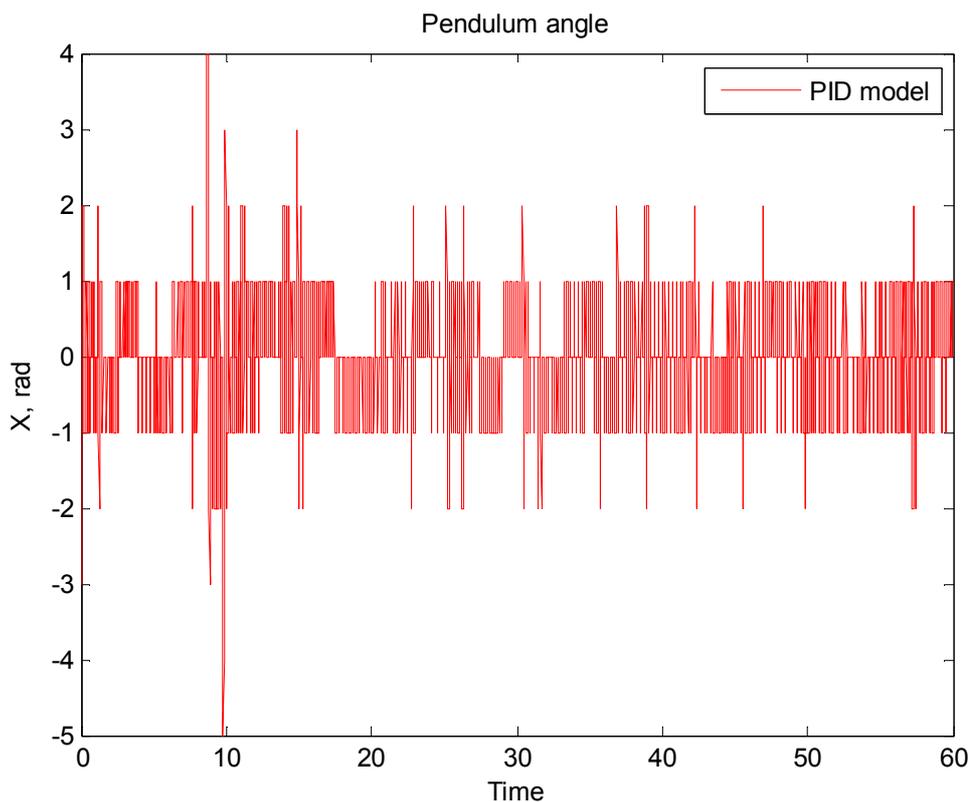


Рис. 20. Динамика изменения угла маятника

На графике можно увидеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 21).

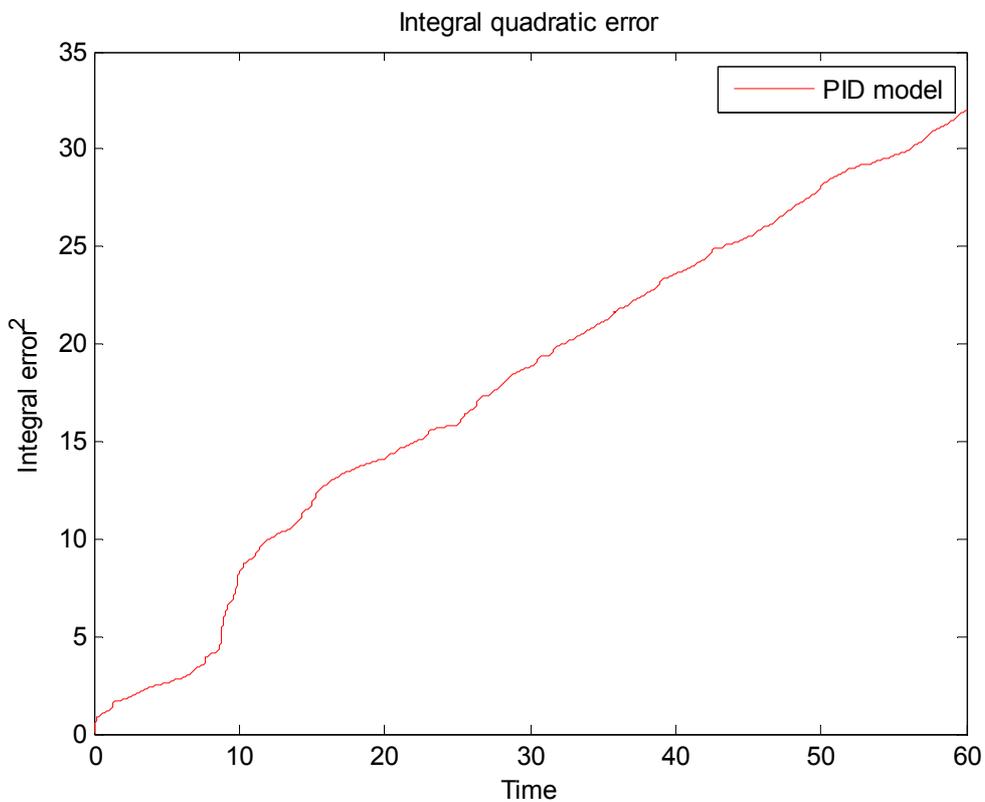


Рис. 21. Квадратичная интегральная ошибка управления

Физическая модель

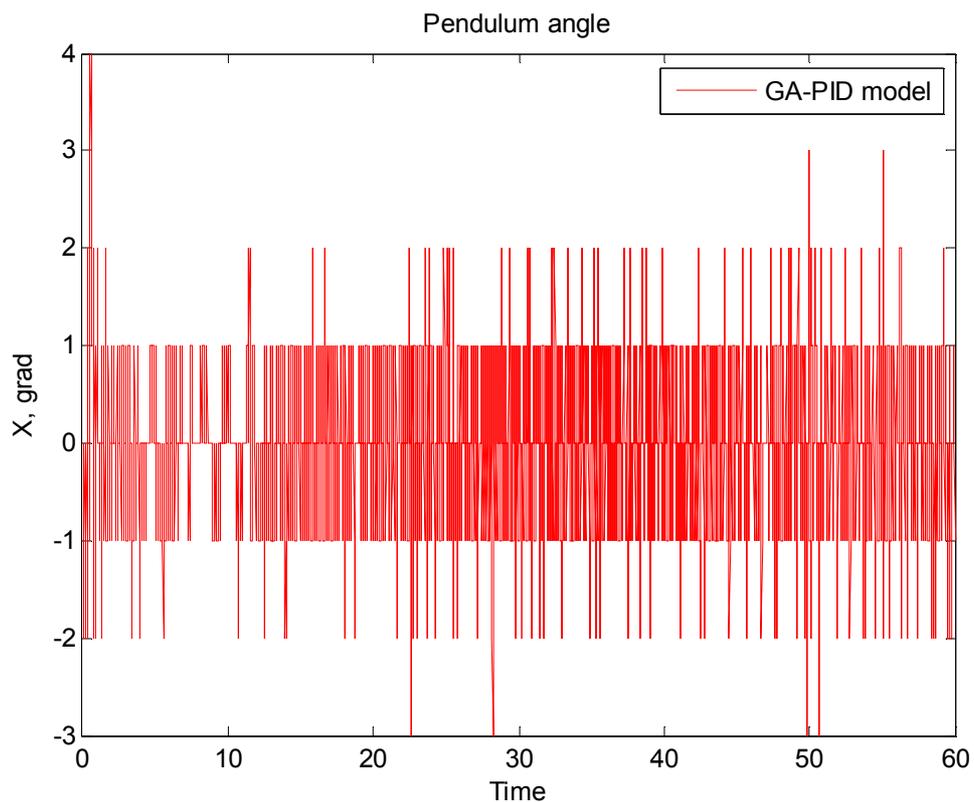


Рис. 22. Динамика изменения угла маятника

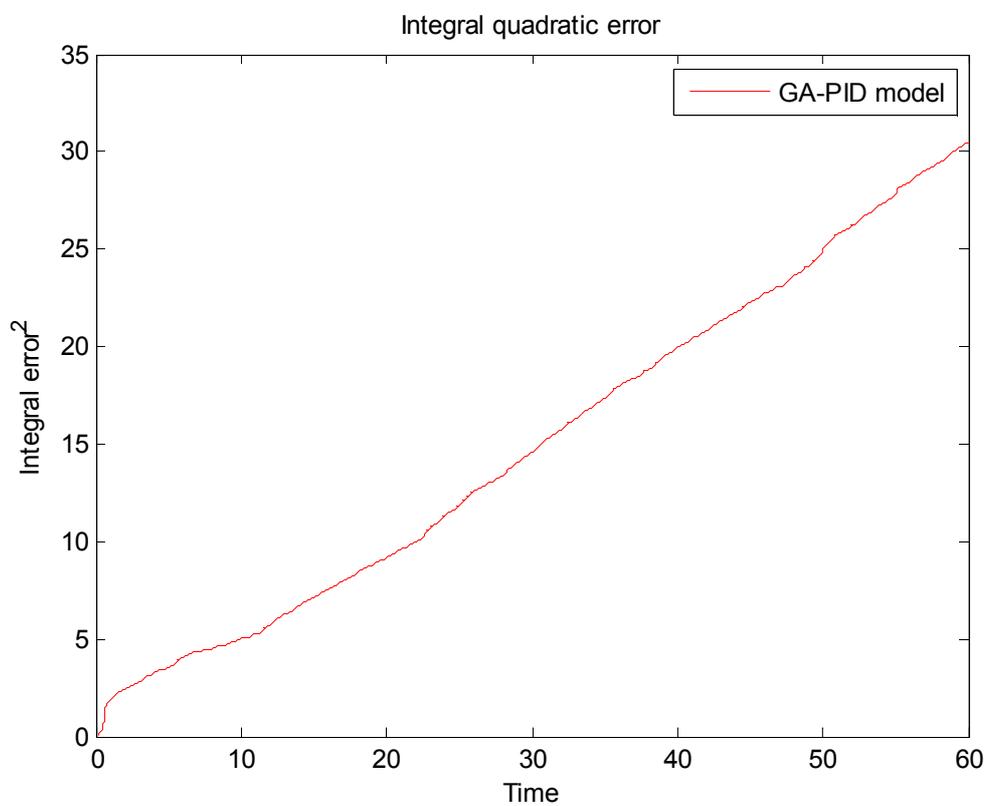


Рис. 23. Квадратичная интегральная ошибка управления

Подобранные с помощью ГА ПИД-коэффициенты справляются лучше, чем ПИД-коэффициенты, подобранные экспертом, но хуже, чем база знаний, созданная в ОБЗ.

Работа ГА-онлайн

Физическая модель

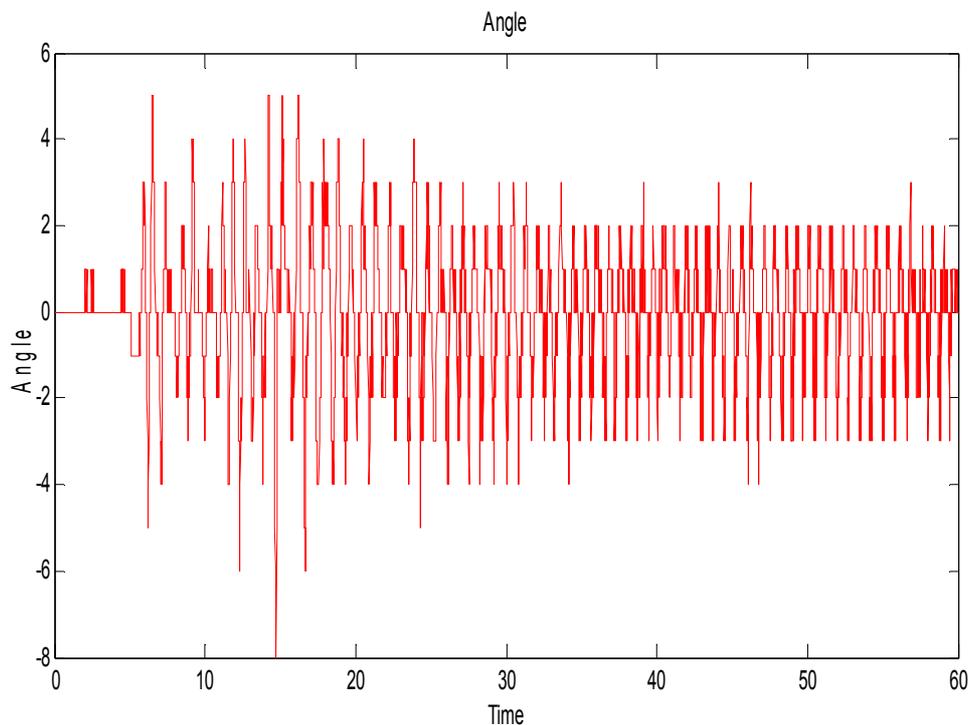


Рис. 24. Динамика изменения угла маятника

На графике можно увидеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 25).

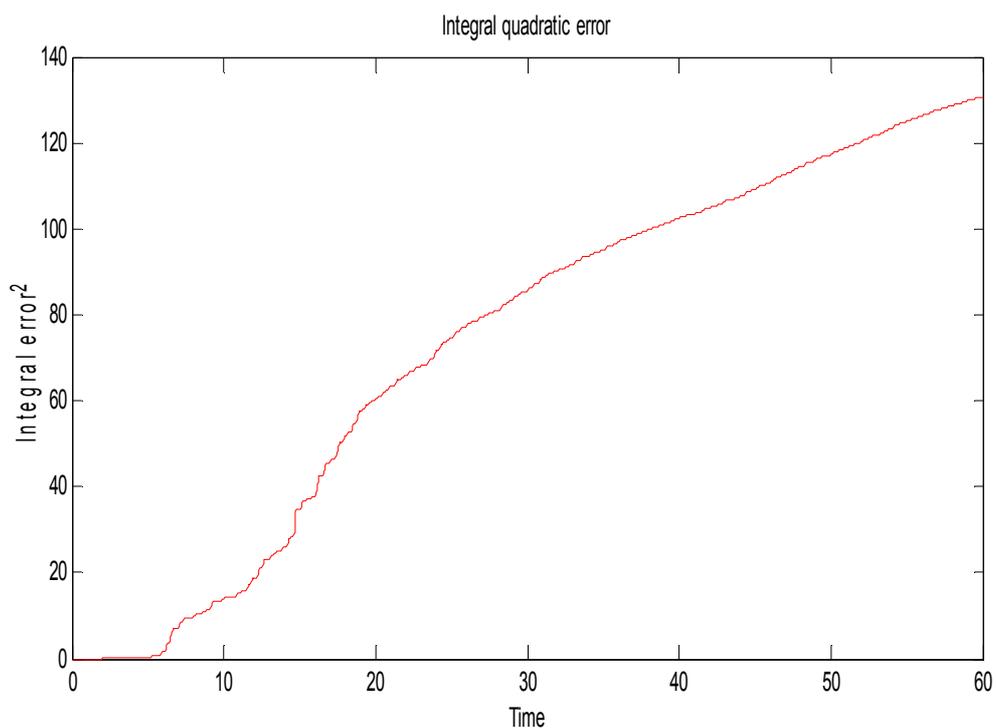


Рис. 25. Квадратичная интегральная ошибка управления

Работа базы из ОБЗ (обучающий сигнал с физической модели)Физическая модель

Обучающий сигнал получен с макета.

Количество входных функций принадлежности для входных переменных {3, 3, 4}. 16 правил. На графике (рис. 24) показано изменение угла маятника во времени.

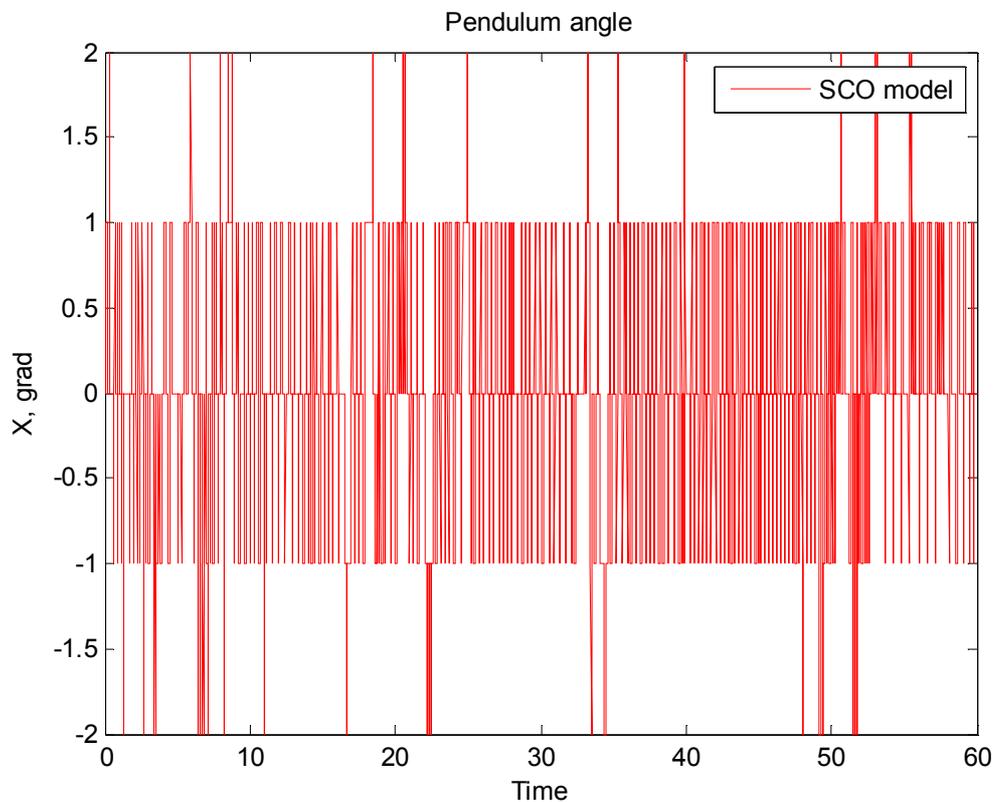


Рис. 24. Динамика изменения угла маятника

На графике можно увидеть квадратичную интегральную ошибку управления (рис. 25).

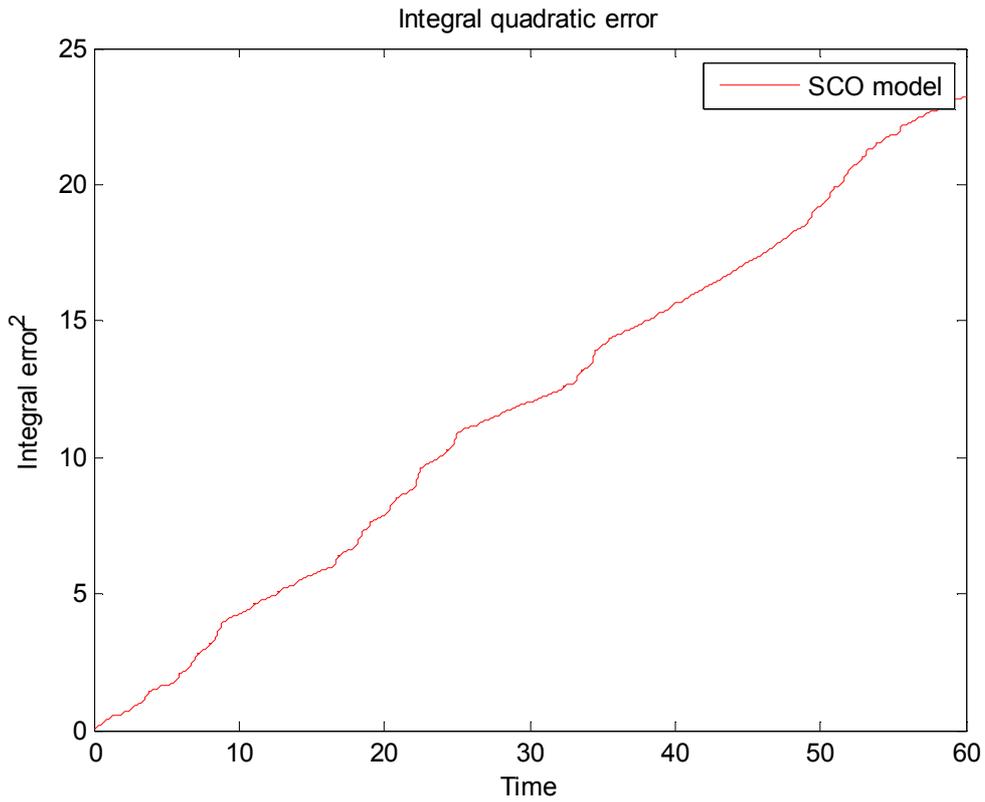


Рис. 25. Квадратичная интегральная ошибка управления

На следующем графике можно увидеть изменение закона управления (рис. 26).

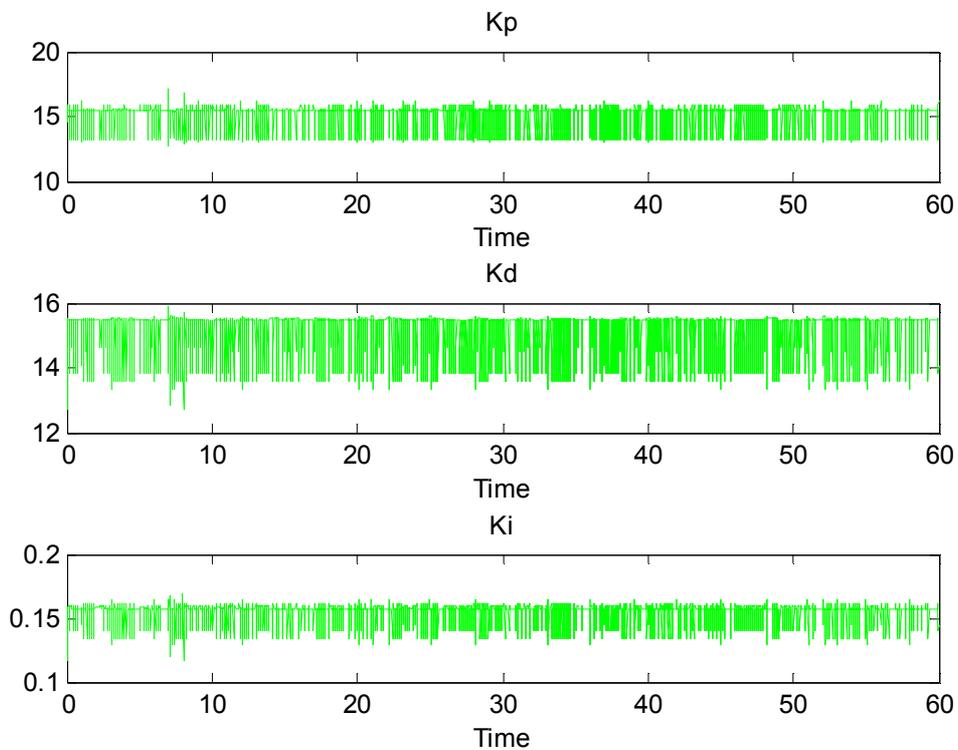


Рис. 26. Изменение закона управления

Данная база работает лучше всех (ошибка управления минимальна).

Цель управления достигнута.

На рис. 27 представлен график сравнения всех представленных САУ.

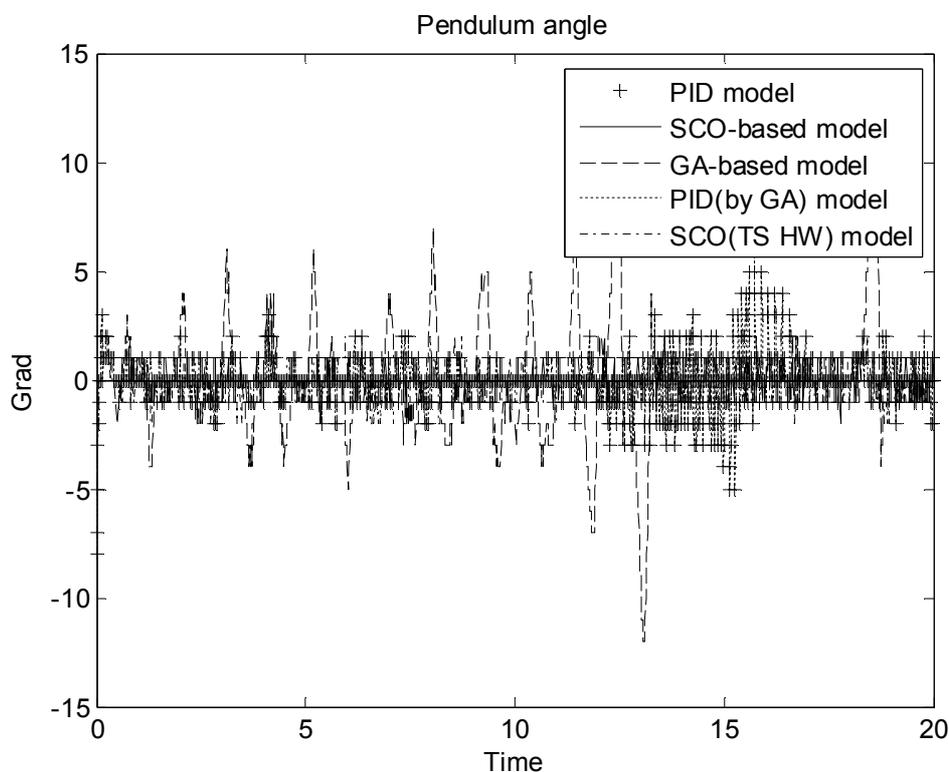


Рис. 27. Общее сравнение качества управления с помощью различных САУ

Выводы

Рассмотренные примеры моделирования управления нелинейным динамическим ОУ с помощью регуляторов на основе ОБЗ (с обучающим сигналом, полученным на *Matlab*-модели и макете), ГА-регулятора, ГА-ПИД-регулятора, а также классического ПИД-регулятора, показали, что:

- ПИД-регулятор и ГА-регулятор в большинстве случаев имеет худшие характеристики управления, чем другие регуляторы.
- ГА-ПИД-регулятор, хотя и имеет высокие значения показателей качества управления, но управление ОУ происходит с достаточно большой ошибкой.
- Регулятор на основе ОБЗ успешно справляется с задачей управления, демонстрируя высокие значения показателей качества управления.
- Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что применение БЗ, спроектированных с помощью ОБЗ, в структуре ИСУ расширяет область промышленных приложений САУ к сложным динамическим ОУ.

Описанная технология проектирования ИСУ в виде ОБЗ включает в себя: многоцелевое использование ГА для поиска оптимального управления; нечеткую нейронную сеть для аппроксимации найденного с помощью ГА оптимального сигнала управления и извлечение на его основе «оптимальной» БЗ, а так же тонкую настройку БЗ на основе ГА с использованием информационно-энтропийных критериев. ОБЗ позволяет (1) осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации; (2) сократить до требуемого минимума необходимое количество датчиков сбора и передачи информации, как в контуре управления, так и в измерительной системе без потери точности

и качества управления. Проектирование робастной ИСУ на основе такого подхода требует минимума исходной информации как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях.

Список литературы

1. Terence T., Kalman Filter Made Easy, 2005.
2. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИГеосистем, 2011.
3. Караткевич С.Г., Литвинцева Л.В., Тятюшкина О.Ю., Григорьев П.Н., Решетников А. Г. Применение интеллектуального программного инструментария в проектировании баз знаний. Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №1. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/15>. – 0421000111\0004.

Приложение

Описание и характеристика устройств

В качестве исполнительного устройства в макете используется драйвер двигателя. Dual VNH3SP30 Motor Driver Carrier MD03A.

Основные характеристики драйвера представлены в таблице П1:

Таблица П1. Характеристика драйвера двигателей

Драйвер моторов	VNH3SP30
Количество каналов управления	2
Минимальное напряжение	5.5 V
Максимальное напряжение	16 V
Постоянный ток канала	9 A
Пиковый ток канала	30 A
Непрерывный выходной ток	15 A
Максимальная частота ШИМ	10 kHz
Защита от обратного напряжения	Y2

Ядром системы и ее центральным элементом является контроллер фирмы Microchip® Chipkit на базе процессора PIC32MX320F128. Основная спецификация контроллера представлена в таблице П2.

Таблица П2. Характеристика контроллера

Тактовая частота	80 MHz
Рабочее напряжение	5V
Входное напряжение	7V–20V
Аналоговые входы	12
Разрешение оцифровки	12-bit
Цифровые входы/выходы	42
ШИМ выходы (16bit)	15
Флэш память	128 KB
SRAM память	16KB
Устройства USART	Да

В качестве измерительной системы используется комбинированная плата датчиков IMU Analog Combo Board-5 Degrees of Freedom IDG500/ADXL335. Основная спецификация данной платы представлена в таблице П3.

Таблица П3. Характеристика датчиков

Диапазон шкалы гироскопа	500°/s
Полный спектр акселерометра	+/-3g
Входное напряжение	3–16V
Аналоговый выход	ДА

Движущей силой макета являются электромоторы. Их характеристики представлены в таблицах П4 и П5.

Таблица П4. Размеры моторов

Размер	37D x 64L mm
Вес	7.5 oz
Диаметр шкифа	6 mm

Таблица П5. Характеристика моторов

Передаточное число	29:1
Скорость свободного вращения 6V	175 rpm1
Напряжение свободного вращения 6V	250 mA1
Ток опрокидывания 6V	2500 mA1
Пусковой момент 6V	55 oz·in1
Напряжение свободного вращения 12V	350 rpm
Напряжение свободного вращения 12V	300 mA
Ток опрокидывания 12V	5000 mA
Пусковой момент 12V	110 oz·in
Длина проводов	11 in

К моторам, через переходники-ступицы, крепятся колеса Pololu Wheel 90x10mm Pair – White. Размеры этих колес представлены в таблице П6.

Таблица П6. Размер колес

Размер	90 x 10 mm
Вес	0.8 oz1
Диаметр вала	3 mm2

Перечисленные детали собираются в единую систему.

Схематично система представлена на рис. П1.

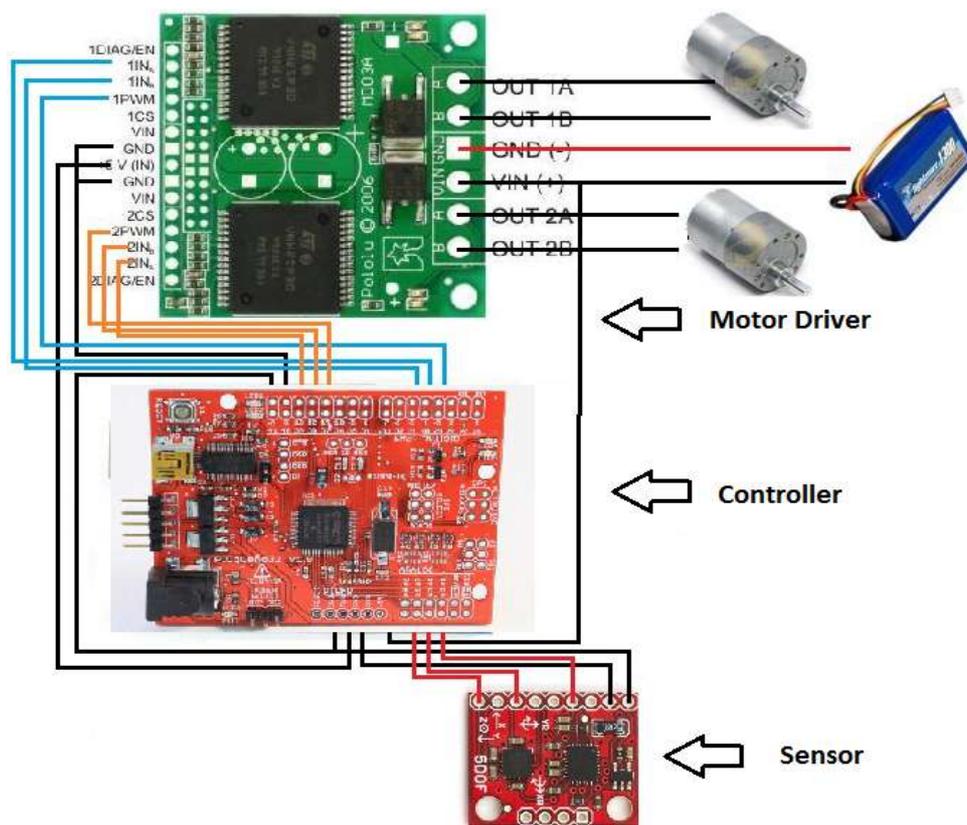


Рис. П1. Комплекс устройств макета

Программа для управления данного макета пишется на языке (C, C++).
Рабочий макет представлен на рис. П2.



Рис. П2. Рабочий макет