

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151>

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПО ИЗУЧЕНИЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ И ТИПОВЫХ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Научная статья

Гамула Д.С.¹, Перухин М.Ю.², Гибадуллин Р.Ф.³ *

³ ORCID : 0000-0001-9359-911X;

^{1,2} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Российская Федерация

³ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (landwatersun[at]mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается разработка и внедрение виртуального лабораторного стенда для изучения автоматических регуляторов и типовых законов регулирования. Целью работы является повышение эффективности обучения студентов в области информатики и вычислительной техники за счёт создания виртуального стенда, который обеспечивает наглядное и безопасное проведение лабораторных работ. Выполнен анализ объекта моделирования для точного воспроизведения его работы в виртуальной среде. Создан интерфейс и основные функциональные элементы, проведены тесты для оценки его работоспособности и удобства использования. Работа демонстрирует преимущества виртуальных стендов перед традиционными физическими установками, включая экономию ресурсов, повышение безопасности, гибкость и масштабируемость. Внедрение виртуальных стендов позволяет проводить лабораторные работы дистанционно, что особенно актуально в условиях современного образовательного процесса. На кафедре «Автоматизированные системы сбора и обработки информации» ФГБОУ ВО «КНИТУ» виртуальные стенды уже успешно используются для изучения периодических процессов, измерения уровня и расхода жидкости, измерения давления. Это подтверждает их эффективность и необходимость в современном образовательном процессе.

Ключевые слова: виртуальный лабораторный стенд, автоматические регуляторы, типовые законы регулирования, цифровые двойники, дистанционное обучение, образовательный процесс.

DIGITAL TWIN OF THE LABORATORY BENCH FOR THE STUDY OF AUTOMATIC REGULATORS AND TYPICAL CONTROL LAWS

Research article

Gamula D.S.¹, Perukhin M.Y.², Gibadullin R.F.³ *

³ ORCID : 0000-0001-9359-911X;

^{1,2} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

³ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (landwatersun[at]mail.ru)

Abstract

The article examines the development and implementation of a virtual laboratory bench for the study of automatic regulators and typical laws of regulation. The aim of the work is to improve the effectiveness of student training in the field of computer science and computer engineering by creating a virtual bench that provides a visual and safe conduct of laboratory work. The analysis of the modelling object is performed to accurately reproduce its operation in the virtual environment. The interface and basic functional elements are created, tests are carried out to evaluate its performance and usability. The work demonstrates the advantages of virtual benches over traditional physical installations, including resource savings, improved safety, flexibility and scalability. The introduction of virtual benches allows conducting laboratory work remotely, which is especially relevant in the conditions of the modern educational process. At the Department of "Automated Systems of Information Acquisition and Processing" of FSBEI HE "KSRTU" virtual benches are already successfully used to study periodic processes, measuring the level and flow of liquids, measuring pressure. This confirms their effectiveness and necessity in the modern educational process.

Keywords: virtual laboratory bench, automatic controllers, typical control laws, digital twins, distance learning, educational process.

Введение

Одним из ключевых аспектов образования студентов в области информатики и вычислительной техники является закрепление теоретических знаний через выполнение практических работ. Однако традиционные лабораторные установки часто обладают высокой стоимостью, сложной структурой и требуют обширной технической документации. Работа с таким оборудованием требует наличия квалифицированного персонала, а процесс модернизации и изменения конфигурации установок затруднён.

Современные технологии позволяют преодолеть эти проблемы благодаря созданию цифровых двойников и виртуальных моделей реальных лабораторных стендов. Внедрение виртуальных лабораторных стендов в образовательный процесс становится актуальной задачей для университетов. Такие стенды позволяют наглядно

демонстрировать изучаемые явления и процессы, уменьшать погрешности при проведении экспериментов, делить студентов на небольшие группы для выполнения работ, выгружать данные для последующей обработки и проводить удалённую работу [1], [2], [3].

Целью данной работы является повышение эффективности обучения студентов путём разработки виртуального стенда для изучения автоматических регуляторов и типовых законов регулирования.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих виртуальных стендов с аналогичным функционалом и сформулировать требования к разрабатываемому продукту;
- выбрать подходящую среду разработки;
- провести анализ объекта моделирования;
- разработать виртуальный стенд.

Актуальность данной работы заключается в трансформации цифровых технологий в образовательный процесс и необходимости в цифровых лабораторных стендах, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с физическими. Виртуальные стенды позволяют увеличить количество студентов, обучаемых одновременно, за счёт установки специального программного обеспечения на необходимое количество компьютеров. Они также позволяют продемонстрировать результаты действий без риска повреждения реального оборудования, контролировать процесс выполнения работы и обнаруживать ошибки, что ускоряет процесс обучения и освобождает преподавателя от необходимости контролировать работу каждого студента.

На кафедре «Автоматизированные системы сбора и обработки информации» ФГБОУ ВО «КНИТУ» уже были разработаны виртуальные лабораторные стенды по изучению периодических процессов, измерению уровня и расхода жидкости, измерению давления, которые активно используются в образовательном процессе [4], [5], [6], [7], [8].

Использование виртуальных стендов становится необходимостью в современном мире, поскольку они позволяют отрабатывать навыки работы и являются дешёвой заменой реального оборудования [9]. Виртуальные стенды могут использоваться как в промышленности, так и в образовательной деятельности. Они позволяют студентам понять методику выполнения работы, хотя и не обеспечивают полной практической направленности, как работа с реальными приборами. Преимуществом виртуальных стендов является возможность дистанционного обучения.

В целом, использование виртуальных стендов в обучении даёт студентам возможность приобрести практические навыки, экономить ресурсы, обеспечивать безопасность и гибкость, а также повышать воспроизводимость и доступность обучения.

Если сравнивать виртуальный стенд с физическим, то виртуальный стенд обладает рядом значительных преимуществ.

Во-первых, виртуальный стенд создается программно, что устраняет необходимость в дорогостоящем оборудовании и его подключении. Это существенно снижает затраты на оборудование и обслуживание, а также упрощает процесс внедрения стенда в учебный процесс.

Во-вторых, виртуальные стенды обладают высокой доступностью, так как они могут быть использованы в любое время и в любом месте. Это особенно важно в условиях дистанционного обучения или ограниченного доступа к физическим лабораториям. В отличие от физического стенда, который требует физического присутствия на месте, виртуальный стенд позволяет проводить лабораторные работы и эксперименты удаленно.

Третье преимущество виртуального стенда заключается в его масштабируемости. Виртуальные стенды легко копируются и воспроизводятся, что позволяет создавать несколько экземпляров для использования различными группами студентов одновременно. Это невозможно в случае с физическими стендами, где количество установок ограничено физическими ресурсами и пространством.

Четвертое преимущество связано с управлением виртуальными стендами. Управление параметрами виртуального стенда осуществляется программно, что значительно упрощает процесс настройки и конфигурации. В случае с физическими стендами изменение параметров требует вмешательства человека, что может быть трудоемким и времязатратным процессом.

Наконец, отладка программного обеспечения на виртуальных стендах значительно проще и удобнее по сравнению с физическими стендами. Виртуальные стенды позволяют легко выявлять и исправлять ошибки в программном обеспечении, что повышает эффективность учебного процесса. В физическом же стенде возможности для отладки ограничены возможностями приборов, что может затруднять и замедлять процесс выявления и устранения ошибок.

Таким образом, виртуальные стенды представляют собой более экономичное, доступное, масштабируемое, простое в управлении и эффективное в отладке решение по сравнению с традиционными физическими стендами.

Интерфейс эмулятора

Предпринятая ранее попытка разработки виртуального стенда по данной лабораторной работе с одной стороны была успешной [10], с другой стороны имела значительный недостаток, который устранен авторами. В качестве недостатка можно выделить то, что лабораторный стенд запускался только на одной версии операционной системы с использованием определенной версии Framework, что достаточно неудобно, т.к. мало где можно найти компьютеры с ОС Windows XP.

Для разработки данного технологического объекта был выбран проект типа Windows Forms, поскольку эта платформа предлагает обширный набор функций для создания приложений, включая элементы управления, графику и привязку данных. Отличительной особенностью Windows Forms является использование визуального конструктора с функцией перетаскивания в Visual Studio, что значительно упрощает процесс создания приложений. С помощью Windows Forms был создан интерфейс для данного объекта (рисунок 1).

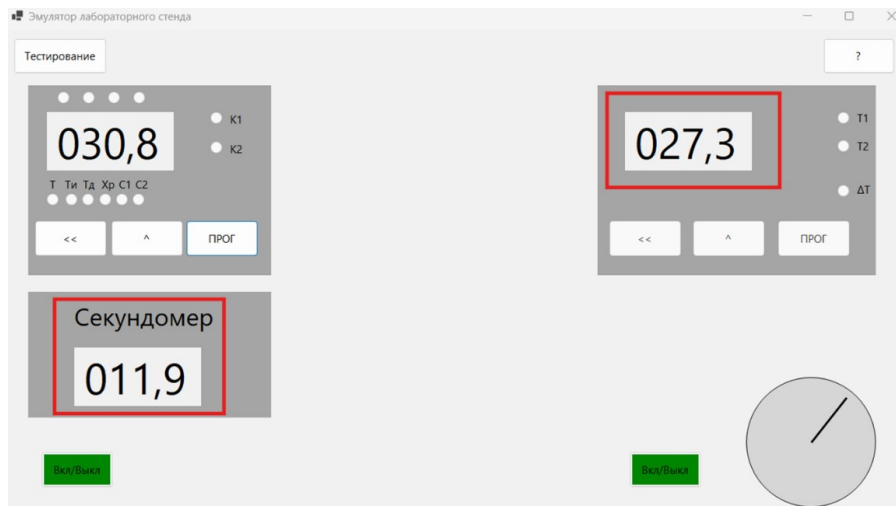


Рисунок 1 - Интерфейс виртуального лабораторного стенда по изучению автоматических регуляторов и законов регулирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.1>

Визуальный элемент `rheostatKnob` эмулирует работу ручки реостата лабораторного стенда. Этот элемент позволяет пользователю регулировать значение путем поворота ручки, отображая визуальные изменения на экране.

Свойства для установки и получения минимального и максимального значения регулировки. При установке значений вызывается метод для перерисовки элемента управления (контроля).

При установке значения происходит проверка на соответствие границам. Значение также преобразуется в угол поворота ручки, и вызывается событие.

Конструктор класса `Form1` включает двойную буферизацию для уменьшения мерцания и устанавливает автоматическую перерисовку при изменении размера контрола.

Далее рассмотрим основные функциональные элементы разработанной программы.

`OnPaint` – метод, который вызывается для рисования контрола. Благодаря этому методу:

- устанавливается режим сглаживания графики;
- рисуется основание ручки в виде эллипса;
- вычисляется и рисуется указатель ручки на основании текущего угла.

`OnMouseDown` – обработчик события нажатия кнопки мыши. Он вызывает метод `UpdateValueFromMouse`, который обновляет значение на основе положения мыши.

`UpdateValueFromMouse` – метод, который обновляет значение реостата на основе положения курсора мыши:

- вычисляет смещение курсора относительно центра ручки;
- вычисляет расстояние от центра ручки до курсора;
- проверяет, находится ли курсор в допустимой области;
- вычисляет угол поворота на основе положения курсора;
- корректирует угол, если он выходит за пределы -135 и 135 градусов;
- обновляет текущее значение на основе угла;
- вызывает событие `OnValueChanged` и перерисовывает контрол.

`OnValueChanged` – виртуальный метод, который вызывается при изменении значения. Данный метод инициирует событие `ValueChanged`, если на него подписаны обработчики.

Интерфейс основной формы описывает функциональность основной формы приложения, которая эмулирует лабораторный стенд. Основная форма включает различные элементы управления и обработчики событий для взаимодействия с пользователем.

Основные переменные:

- `T, Ti, Td, Xp, C1, C2`: параметры настройки регулятора.
- `reg`: переменная для уровня возмущения.
- `mult, U, P, I, D, dt, Tsum, prevP, Dreal, D0, i, t`: дополнительные переменные для расчётов и состояния.
- `Nprog, n`: переменные для управления программным состоянием.

Конструктор `Form1` вызывает метод `InitializeComponent`, который инициализирует компоненты формы.

Обработчики событий:

1. Обработчик события изменения значения возмущения вызывается при изменении значения реостата, который управляет уровнем возмущения. Когда пользователь поворачивает ручку реостата, значение изменяется, и функция обновляет переменную `reg`, которая представляет собой уровень возмущения. Затем это значение отображается на метке `label3`, чтобы пользователь видел текущее значение возмущения.

2. Обработчик события переключения рабочей переменной вызывается при нажатии на кнопку «Прог». При каждом нажатии происходит переключение рабочей переменной, которая определяет, какой параметр будет изменен при следующем нажатии на кнопку «^». В зависимости от значения переменной происходит изменение отображаемого параметра и установка соответствующего состояния кнопки.

3. Обработчик события изменения значения параметра вызывается при нажатии на кнопку «^». В зависимости от значения переменной происходит изменение соответствующего параметра (Т, Тi, Тd, Хр, С1, С2). После изменения значения параметра, происходит его отображение.

4. Обработчик события выбора изменяемого разряда при установке параметров вызывается при нажатии на кнопку «<<». При каждом нажатии происходит изменение множителя, который определяет, какой разряд параметра будет изменен при следующем нажатии на кнопку «^». Затем функция устанавливает состояние кнопок в зависимости от значения.

5. Обработчик события включения стенда вызывается при нажатии на кнопку включения стенда. Если стенд был выключен (кнопка красная), то после нажатия кнопка меняет цвет на зеленый, и все элементы управления становятся доступными для пользовательского взаимодействия. Если стенд был включен, то после нажатия кнопка меняет цвет обратно на красный, и все элементы управления становятся недоступными.

6. Обработчик события включения возмущения вызывается при нажатии на кнопку включения возмущения. Если возмущение было выключено (кнопка красная), то после нажатия кнопка меняет цвет на зеленый, и ручка реостата становится доступной для пользовательского взаимодействия, а таймер запускается для обновления возмущения. Если возмущение было включено, то после нажатия кнопка меняет цвет обратно на красный, ручка реостата становится недоступной, и таймер останавливается.

Дополнительные функции:

– вызов файла с методическими материалами осуществляется при нажатии на кнопку «?» и открывает PDF файл с методическими материалами, используя системный процесс (рисунок 2). В методических материалах содержится как теория по данной теме, так и методика по выполнению лабораторной работы и контрольные вопросы для подготовки к опросу. Если файл не удается открыть, отображает сообщение об ошибке;

– вызов формы тестирования осуществляется с помощью нажатия на кнопку "Test" открывает новую форму для тестирования. Основная форма скрывается, и снова отображается, когда форма тестирования закрывается. Таким образом, у преподавателя есть возможность оценки знаний, полученных студентом после изучения теоретического материала.

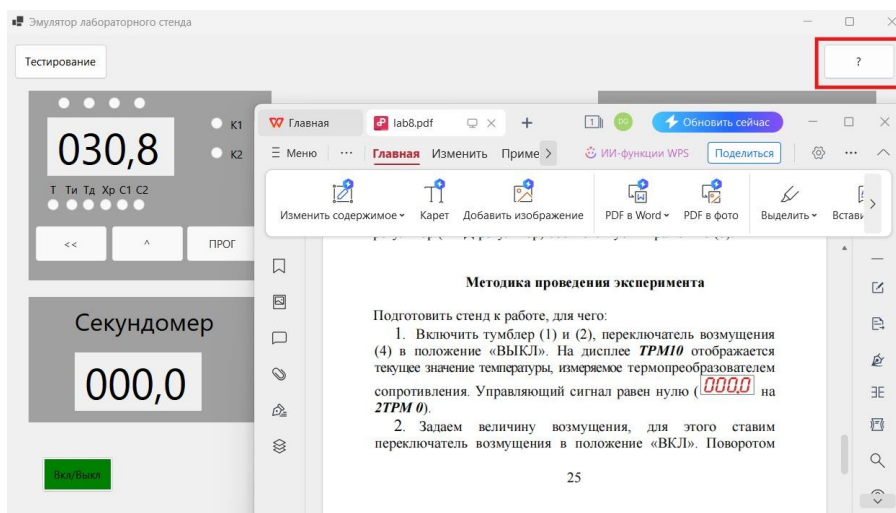


Рисунок 2 - Интерфейс виртуального лабораторного стенда по изучению автоматических регуляторов и законов регулирования (методические материалы)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.2>

Классический ПИД-регулятор формирует выходной сигнал как комбинацию трёх основных компонентов:

1. Пропорциональная компонента (P). Эта часть выходного сигнала пропорциональна текущей ошибке регулирования. Она зависит напрямую от разницы между заданным и текущим значением регулируемой величины.

2. Интегральная компонента (I). Интегральная часть выходного сигнала вычисляется как интеграл от ошибки по времени. Это помогает устранить статическую ошибку системы, обеспечивая нулевое значение ошибки в установившемся режиме.

3. Дифференциальная компонента (D). Дифференциальная часть выходного сигнала определяется производной ошибки по времени. Она способствует быстрой реакции системы на изменения в регулируемой величине, предотвращая перегуливание и улучшая динамические характеристики системы [10].

Все эти компоненты совместно формируют итоговый выходной сигнал ПИД-регулятора, обеспечивая точное и стабильное управление регулируемым объектом.

Передаточная функция непрерывного ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{1}{X_p} \left(\Delta\sigma + T_d \frac{\Delta(\Delta\sigma)}{t} + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^n \Delta\sigma \Delta t_{\text{изм}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

где:

X_p – предел пропорциональности (обратная величина коэффициента усиления (k) выражается в процентах: $k = (1/X_p) 100\%$;

$\Delta\sigma$ – разность между заданным $T_{уст}$ и текущим T_i значением, то есть величина рассогласования;

T_d – постоянная времени дифференцирования;

$\Delta(\Delta\sigma)$ – разность между соседними рассогласованиями $\Delta\sigma_i$ и $\Delta\sigma_{i-1}$;

$\Delta t_{изм} \approx 1,5$ сек. – время между двумя соседними измерениями Δt_i и Δt_{i-1} ;

t – время прошедшее с начала измерения;

$T_{инт}$ – постоянная времени интегрирования;

$\sum_{i=0}^n \Delta\sigma_i$ – накопленная сумма рассогласований.

Для реализации работы ПИД-регулятора использовался элемент timer.

Событие timer1_Tick срабатывает с частотой, определенной таймером timer1. Обработчик данного события выполняет код для управления процессом (рисунок 3).

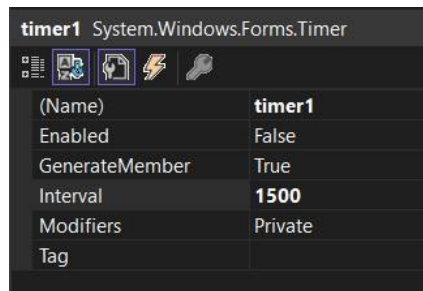


Рисунок 3 - Свойства элемента timer1

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.3>

Псевдокод обработчика события timer1_Tick:

// Инициализация и защита от деления на ноль

если $T_i == 0$ тогда

$T_i = 9999$

конец

если $T_d == 0$ тогда

$t = 1$

конец

// Рассчитывание ошибки

ошибка = $T - reg$

$P = abs(ошибка)$

// Обновление суммы ошибок для интегральной составляющей

$Tsum += P$

*$I = (1 / T_i) * Tsum * dt$*

// Рассчёт дифференциальной составляющей

*$D = Td * ((P - prevP) / t)$*

prevP = P

$t = t + 1.5$

// Ограничение дифференциальной составляющей

если $D > C2$ тогда

*$D = C2 * 4$*

конец

если $D > 1$ тогда

$Dreal = D$

$D0 = D$

$n = 1$

конец

// Вычисление управляющего сигнала

*$U = (1 / X_p) * (P + I + Dreal) * 100$*

$U = \max(C1, \min(C2, U))$

// Добавление случайного разброса

случайное_значение = случайное_число - 0.5

$U = U + \text{случайное_значение}$

// Параболическое изменение Dreal

если $Dreal \neq D$ тогда

если $Dreal > D$ тогда

*$Dreal = D0 * (0.5)^{(n / 3.33)}$*

иначе

$$D_{real} = D_0 * (2)^{(n / 3.33)}$$

конец

$n = n + 1$

конец

// Обновление текста на метке

`label2.Text = форматировать(U, "F1").дополнить_нулём_слева(5)`

Объяснения псевдокода:

1. Инициализация и защита от деления на ноль: проверка значений T_i и T_d и их установка при необходимости.
2. Расчет ошибки: вычисление ошибки как разности между T и reg , и её абсолютное значение.
3. Обновление суммы ошибок для интегральной составляющей: обновление накопленной суммы ошибок и вычисление интегральной составляющей.
4. Расчет дифференциальной составляющей: вычисление дифференциальной составляющей и обновление предыдущего значения ошибки.
5. Ограничение дифференциальной составляющей: проверка и ограничение значения D .
6. Вычисление управляющего сигнала: вычисление управляющего сигнала U и его ограничение в заданном диапазоне.
7. Добавление случайного разброса: добавление случайного значения к U .
8. Параболическое изменение D_{real} : модификация D_{real} с использованием параболической зависимости.
9. Обновление текста на метке: форматирование и обновление значения на метке `label2`.

Таким образом, код осуществляет вычисление сигнала управления U на основе текущего состояния системы и параметров PID-регулятора.

2.1. Секундомер

Для реализации работы секундомера использовался элемент `timer`.

`Timer2_Tick`: это событие срабатывает с заданной частотой, определенной таймером `timer2`. Внутри этого события выполняется код для управления процессом (рисунок 4).

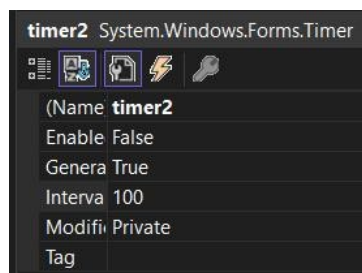


Рисунок 4 - Свойства элемента `timer2`

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.4>

При срабатывании события значение i увеличивается на 0.1 и записывается в `label3`.

2.2. Форма тестирования

Данная форма служит в роли проверки знаний студентов (рисунок 5). Основная задача этой формы – отображение вопросов из теста, выбор ответов и подсчет результатов. Вопросы загружаются из файла JSON (JavaScript Object Notation, легкий формат обмена данными), и пользователь может отвечать на них, переходя к следующему вопросу с помощью кнопки.

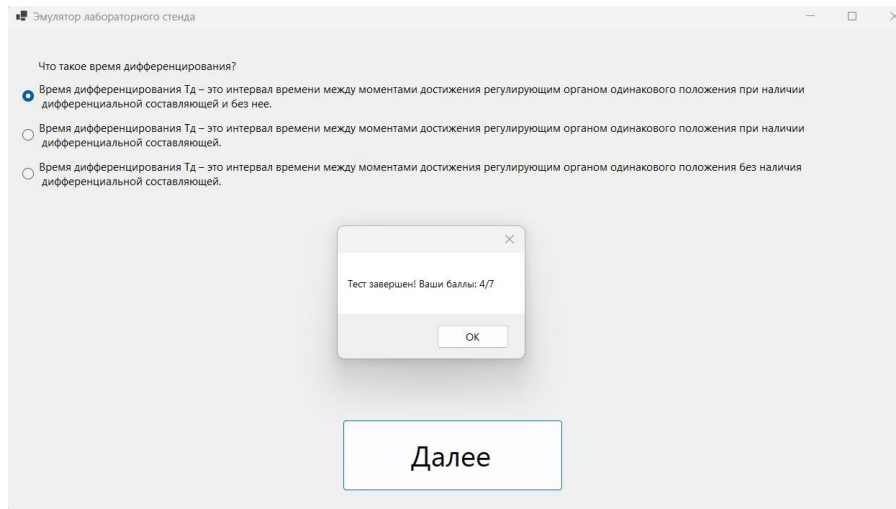


Рисунок 5 - Форма тестирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.5>

Обзор функциональности:

1. Инициализация формы. При создании формы вызывается конструктор, который инициализирует компоненты, загружает вопросы из файла JSON и отображает первый вопрос.
2. Загрузка вопросов из JSON файла «LoadQuestionsFromFile». Если файл существует, читается его содержимое и десериализуется в список объектов Question. Если файл не найден, показывается сообщение об ошибке и форма закрывается.
3. Отображение текущего вопроса и его ответы «DisplayCurrentQuestion». Установка видимости радиокнопок в зависимости от количества ответов. Конфигурация и размещение радиокнопки с помощью метода ConfigureRadioButton.
4. Настройка параметров радиокнопок и их положения на форме «ConfigureRadioButton». Если количество ответов меньше пяти, соответствующие радиокнопки скрываются.
5. Обработка выбора ответа и переход к следующему вопросу «button1_Click». Определяет индекс выбранного ответа с помощью метода GetSelectedAnswerIndex. Проверяет правильность ответа и обновляет счет. Переходит к следующему вопросу или завершает тест, показывая итоговый результат и закрывая форму.
6. Метод GetSelectedAnswerIndex возвращает индекс выбранного ответа, либо -1, если ответ не выбран. Это помогает в проверке правильности ответа.

Заключение

Одним из ключевых аспектов образования студентов в области информатики и вычислительной техники является закрепление теоретических знаний через выполнение практических работ. Часто такие работы выполняются с использованием лабораторных установок, которые обладают высокой стоимостью, сложной структурой и обширной технической документацией. В условиях растущих требований к квалификации преподавательского состава и сложности модернизации оборудования, актуальным становится применение виртуальных стендов.

Использование виртуальных стендов позволяет существенно увеличить количество одновременно обучающихся студентов, благодаря возможности установки программного обеспечения на несколько компьютеров. Виртуальные стенды предоставляют безопасную среду для выполнения практических работ, предотвращая риск повреждения реального оборудования, и позволяют эффективно контролировать процесс выполнения заданий и выявлять ошибки. Это ускоряет процесс обучения и снижает нагрузку на преподавателей, устраняя необходимость постоянного контроля над каждым студентом.

В результате выполненной работы был разработан виртуальный стенд, который отвечает современным требованиям образовательного процесса и способствует более эффективному усвоению теоретических знаний через практическое применение. Внедрение таких стендов в учебный процесс способствует повышению качества образования, обеспечивая студентов необходимыми навыками и знаниями в области автоматических регуляторов и типовых законов регулирования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Пикулев А.Н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.6>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Pikulev A.N., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.151.6>

Список литературы / References

1. Перухин М. Ю. Цифровой двойник лаборатории систем управления химико-технологическими процессами / М. Ю. Перухин, М. Ю. Васильева, Г. К. Кадырова // Современные наукоемкие технологии. — 2021. — № 6-1. — С. 84–90. DOI: 10.17513/snt.38702
2. Черемисина Е. Н. Роль виртуальной компьютерной лаборатории на основе технологии облачных вычислений в современном компьютерном образовании / Е. Н. Черемисина, О. Е. Антипов, М. А. Белов // Дистанционное и виртуальное обучение. — 2012. — № 1. — С. 53–60.
3. Саданова Б. М. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза / Б. М. Саданова, А. В. Олейникова, И. В. Альберти [и др.] // Молодой ученый. — 2016. — № 4. — С. 71–74.
4. Перухин М. Ю. Разработка виртуального стенда для изучения управления периодическими процессами / М. Ю. Перухин, Е. В. Урываев // Вестник Технологического университета. — 2016. — Т. 19. — № 21. — С. 154–156. — EDN XССКДТ.
5. Перухин М. Ю. Разработка виртуального стенда для изучения управления периодическими процессами / М. Ю. Перухин // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017) : Материалы XVI Международной конференции имени А.Ф. Терпугова, Казань, 29 сентября – 03 октября 2017 года. — Казань : Издательство научно-технической литературы, 2017. — С. 213–217.
6. Кадырова Г. К. Разработка виртуального лабораторного стенда в среде CODESYS / Г. К. Кадырова, Д. Ю. Подрядова, Л. И. Яруллина [и др.] // Образование России и актуальные вопросы современной науки : сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 27–28 мая 2019 года. — Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2019. — С. 268–271. — EDN WTGUFU.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669928 Российская Федерация. Измерение давления : №2022669365 : заявл. 21.10.2022 : опублик. 26.10.2022 / М. Ю. Перухин, Р. Д. Кагиров, А. Р. Герке [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611267 Российская Федерация. Измерение уровня и расхода жидкостей : №2021610439 : заявл. 19.01.2021 : опублик. 25.01.2021 / М. Ю. Перухин, Г. К. Кадырова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).
9. Амандиков М. А. Создание виртуальных стендов по информационным системам с использованием программных средств / М. А. Амандиков // Научное обозрение. Технические науки. — 2016. — № 1. С. 5–8.
10. Перухин М. Ю. Виртуальные лабораторные стенды в образовании / М. Ю. Перухин, Р. Н. Гайнуллин, А. П. Смирнова // Интегральные и дифференциальные парадигмы развития науки и практики России : Сборник научных статей по итогам Национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29-30 ноября 2018 года. — Санкт-Петербург : Общество с ограниченной ответственностью «Редакционно-издательский центр «КУЛЬТ-ИНФОРМ-ПРЕСС», 2018. — С. 144–146.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Perukhin M. Yu. Cifrovoy dvojniki laboratorii sistem upravlenija himiko-tehnologicheskimi processami [Digital twin of a laboratory for control systems of chemical-technological processes] / M. Yu. Perukhin, M. Yu. Vasilieva, G. K. Kadyrova // Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern High Technologies]. — 2021. — № 6-1. — P. 84–90. DOI: 10.17513/snt.38702 [in Russian]
2. Cheremisina E. N. Rol' virtual'noj komp'yuternoj laboratorii na osnove tehnologii oblachnyh vychislenij v sovremennom komp'yuternom obrazovanii [The role of a virtual computer laboratory based on cloud computing technology in modern computer education] / E. N. Cheremisina, O. E. Antipov, M. A. Belov // Distancionnoe i virtual'noe obuchenie [Distance and Virtual Learning]. — 2012. — № 1. — P. 53–60. [in Russian]
3. Sadanova B. M. Primenenie vozmozhnostej virtual'nyh laboratorij v uchebnom processe tehničeskogo vuza [Application of virtual laboratory capabilities in the educational process of a technical university] / B. M. Sadanova, A. V. Oleinikova, I. V. Alberti [et al.] // Molodoy uchenyj [Young Scientist]. — 2016. — № 4. — P. 71–74. [in Russian]
4. Perukhin M. Yu. Razrabotka virtual'nogo stenda dlja izuchenija upravlenija periodičeskimi processami [Development of a virtual stand for the study of periodic process control] / M. Yu. Petrukhin, E. V. Uryvaev // Vestnik Tehnologičeskogo universiteta [Bulletin of the Technological University]. — 2016. — Vol. 19. — № 21. — P. 154–156. — EDN XССКДТ. [in Russian]
5. Perukhin M. Yu. Razrabotka virtual'nogo stenda dlja izuchenija upravlenija periodičeskimi processami [Development of a virtual stand for the study of periodic process control] / M. Yu. Perukhin // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie (ITMM-2017) [Information technologies and mathematical modeling (ITMM-2017)] : Proceedings of the XVI International Conference named after A.F. Terpugov, Kazan, September 29 – 03, 2017. — Kazan : Publishing House of Scientific and Technical Literature, 2017. — P. 213–217. [in Russian]
6. Kadyrova G. K. Razrabotka virtual'nogo laboratornogo stenda v srede CODESYS [Development of a virtual laboratory stand in the CODESYS environment] / G. K. Kadyrova, D. Y. Kontrakova, L. I. Yarullina [et al.] // Obrazovanie Rossii i aktual'nye voprosy sovremennoj nauki [Education of Russia and topical issues of modern science] : collection of articles of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Penza, May 27-28, 2019. — Penza : Penza State Agrarian University, 2019. — pp. 268-271. — EDN WTGUFU. [in Russian]
7. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2022669928 Rossijskaja Federacija. Izmerenie davlenija [Certificate of state registration of the computer program No. 2022669928 Russian Federation. Pressure measurement] : No.2022669365 : application 21.10.2022 : publ. 26.10.2022 / M. Yu. Perukhin, R. D. Kagirov, A. R. Gerke [et

al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University". [in Russian]

8. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2021611267 Rossijskaja Federacija. Izmerenie urovnja i rashoda zhidkostej [Certificate of state registration of the computer program No. 2021611267 Russian Federation. Measuring the level and flow of liquids] : No.2021610439 : application 19.01.2021 : publ. 25.01.2021 / M. Yu. Perukhin, G. K. Kadyrova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FGBOU VO "KNITU"). [in Russian]

9. Amandikov M. A. Sozdanie virtual'nyh stendov po informacionnym sistemam s ispol'zovaniem programmnyh sredstv [Creation of virtual stands for information systems using software tools] / M. A. Amandikov // Nauchnoe obozrenie. Tehnicheskie nauki [Scientific Review. Technical Sciences]. — 2016. — № 1. — P. 5–8. [in Russian]

10. Perukhin M. Yu. Virtual'nye laboratornye stendy v obrazovanii [Virtual laboratory stands in education] / M. Yu. Perukhin, R. N. Gainullin, A. P. Smirnova // Integral'nye i differencial'nye paradigmy razvitija nauki i praktiki Rossii [Integral and differential paradigms of the development of science and practice in Russia] : A collection of scientific articles based on the results of the National Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 29-30, 2018. — St. Petersburg : Limited Liability Company "Editorial and publishing center "KULT-INFORM-PRESS", 2018. — P. 144–146. [in Russian]