

УДК 62-503.55:004

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЛАБОРАТОРИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ****Перухин М.Ю., Васильева М.Ю., Кадырова Г.К.***ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань,
e-mail: perukhin@inbox.ru, marinav@inbox.ru, kadyrova.gulsat@gmail.com*

На факультете управления и автоматизации Казанского национального исследовательского технологического университета, после обновления базы стандов лаборатории систем управления химико-технологическими процессами, следующим шагом стало создание цифрового двойника лаборатории. Лаборатория оснащена шестью современными лабораторными стандами, оснащенными оборудованием и средствами контроля и управления. Лабораторная работа позволяет студенту ознакомиться с процессами, протекающими в ходе лабораторной работы, получить навыки работы с приборами, самостоятельно осуществлять их настройку и наладку. Авторами описываются преимущества и недостатки классических и виртуальных лабораторных стандов. В работе предлагается внедрение технологии создания цифровых двойников, разработка виртуальных моделей реальных лабораторных стандов, реализация удаленной работы в рамках образовательного процесса. Описана работа виртуального лабораторного станда для измерения расхода и уровня жидких сред в ручном и автоматическом режимах. Виртуальный лабораторный стенд, разработанный в среде CoDeSys, способен полностью заменить работу на реальном лабораторном стенде. Работа на виртуальном стенде позволяет дополнительно освоить языки программирования и изучить работу программируемого логического контроллера при удаленном подключении к реальному стенду лаборатории. Востребованность цифровых двойников лабораторий обусловлена следующими факторами: отсутствием дорогостоящих лабораторных стандов в филиалах и небольших университетах, необходимостью выполнения лабораторной работы в дистанционном формате, предоставлении возможности параллельной работы на стенде для больших групп студентов в рамках одного занятия, обеспечением всех студентов, в том числе с ограниченными возможностями, равными возможностями. Практическая актуальность внедрения цифровых двойников в университетах обуславливается возможностью значительного повышения эффективности образовательного процесса.

Ключевые слова: цифровой двойник, система автоматизации, программируемый логический контроллер, дистанционное обучение, технологический процесс, виртуальный стенд

**DIGITAL TWIN OF THE LABORATORY OF CONTROL SYSTEMS
OF CHEMICAL-TECHNOLOGICAL PROCESSES****Perukhin M.Yu., Vasileva M.Yu., Kadyrova G.K.***Kazan National Research Technological University, Kazan, e-mail: perukhin@inbox.ru,
marinav@inbox.ru, kadyrova.gulsat@gmail.com*

At the Faculty of Management and Automation of the Kazan National Research Technological University, after updating the base of the laboratory stands for control systems for chemical-technological processes, the next step was the creation of a digital twin of the laboratory. The laboratory is equipped with six modern laboratory stands, equipped with equipment and means of monitoring and control. Laboratory work allows the student to get acquainted with the processes occurring in the course of laboratory work, gain skills in working with devices, independently carry out their adjustment and commissioning. The authors describe the advantages and disadvantages of classical and virtual laboratory stands. The paper proposes the introduction of technology for creating digital twins, the development of virtual models of real laboratory stands, the implementation of remote work within the educational process. The operation of a virtual laboratory bench for measuring flow rate and level of liquid media in manual and automatic mode. Virtual laboratory stand, developed in the CoDeSys environment, it can completely replace the work on a real laboratory bench. Working on a virtual stand allows you to additionally learn programming languages and study the operation of a programmable logic controller when connected remotely to a real laboratory stand. The demand for digital twins of laboratories is due to the following factors: the lack of expensive laboratory stands in branches and small universities, the need to perform laboratory work in a remote format, providing the possibility of parallel work at the stand for large groups of students within one lesson, providing all students, including those with limited opportunities, equal opportunities. The practical relevance of the introduction of digital twins in universities is due to the possibility of a significant increase in the efficiency of the educational process.

Keywords: digital twin, automation system, programmable logic controller, distance learning, technological process, virtual stand

Современное производство предполагает внедрение цифровых технологий на всех этапах жизненного цикла создаваемой продукции. Наиболее интересной задачей, относящейся к развитию цифровых производств, можно назвать технологию создания и использования цифровых двойников, ставшей одним из главных направлений развития четвертой индустриальной

революции (Индустрия 4.0) [1–3]. Под цифровым двойником понимают виртуальный прототип реального объекта, который полностью имитирует его характеристики и внутренние процессы. Объектом цифрового прототипирования может быть практически что угодно.

Приведем примеры внедрения технологии создания цифровых двойников в раз-

ных отраслях: реализация цифровых двойников для управления газовым промыслом описана в [4], в [5] описаны основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия, разработка новых решений в области использования цифровых двойников объектов атомной энергетики в [6], в [7] рассмотрена система поддержки принятия решений при подготовке нефти с использованием цифрового двойника технологической установки.

Внедрение цифровых двойников в образовательном процессе в университетах является неотъемлемой составляющей развития промышленности. В образовательную реальность уверенно входят достижения искусственного интеллекта, технологии виртуальных и дополненной реальности, большие данные и т.д. В публикации 2021 г. в журнале «Высшее образование в России» подробно рассмотрены перспективы применения цифровых двойников в образовании [8].

Немаловажным для внедрения цифровых двойников стало применение технологий дистанционного обучения, получивших широкое распространение в условиях карантинных мероприятий 2020 г. Получена возможность дистанционного обучения на виртуальных лабораторных установках или дистанционного подключения к реальным установкам в условиях введения ограничительных мер в 2020 г. По определению В.В. Трухина, «виртуальная лаборатория представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить опыты без непосредственного контакта с реальной установкой или при полном отсутствии таковой» [9].

Внедрение технологии создания цифровых двойников, разработка виртуальных

моделей реальных стендов кафедр, возможность удаленной работы в рамках образовательного процесса является актуальной задачей для университетов. Например, лабораторный практикум важен и является неотъемлемой частью занятий для закрепления теоретических положений лекционного материала путем наглядной демонстрации изучаемых явлений и процессов. Возможности, которые предоставляют виртуальные лабораторные стенды – это малая погрешность при проведении эксперимента, возможность разделять студентов на небольшие группы для выполнения работ, так как работа может проводиться на нескольких компьютерах, возможность выгрузки данных для последующей обработки, удаленная работа и т.д. [10–11].

На факультете управления и автоматизации Казанского национального исследовательского технологического университета после обновления базы стендов лаборатории систем управления химико-технологическими процессами (СУХТП) следующим шагом стало создание цифрового двойника лаборатории.

Результаты исследования и их обсуждение

Лаборатория СУХТП оснащена шестью современными лабораторными стендами, оснащенными оборудованием и средствами контроля и управления, включая оборудование фирмы ОВЕН, и дисплейным классом. Часть лабораторных стендов показана на рис. 1. На стендах лаборатории выполняются лабораторные работы: измерение температуры, измерение давления, измерение расхода и количества вещества, измерение уровня жидкости, автоматические системы регулирования, статика и динамика систем.



а)



б)

Рис. 1. Лабораторные стенды СУХТП: а) стенды по измерению параметров, б) стенды по градуировке и автоматическим системам регулирования

При принятии решения о виртуализации лабораторных стендов лаборатории СУХТП преследовались следующие цели:

1. Предоставить возможность выполнять лабораторную работу на занятии индивидуально или небольшими группами.
2. Расширить функциональность стенда за счет программируемого логического контроллера.
3. Повысить интерес учащихся и приобрести первичные навыки программирования в программной среде CoDeSys.
4. Предоставить возможность работы удаленно на стендах из дома или филиала вуза.

Часть стендов лаборатории уже оцифрована и переведена нами в виртуальные стенды. По необходимости, доступ к стендам в режиме реального времени предполагается осуществлять через OwenCloud (сервис) – облачный сервис компании ОВЕН, применяемый для удаленного мониторинга, управления и хранения архивов данных приборов, используемых в системах автоматизации. Приборы подключаются к сервису по интерфейсам RS-485 (с помощью специальных сетевых шлюзов) или Ethernet (в этом случае требуется подключение приборов к сети с доступом к интернету).

В лаборатории СУХТП установлен классический лабораторный стенд для выполнения двух лабораторных работ (рис. 2): «Измерение расхода» и «Измерение уровня». Для выполнения лабораторных работ нами разработан виртуальный лабораторный стенд для измерения расхода и уровня жидких сред [12–14]. Однако полный переход на виртуальную лабораторию может

привести к тому, что выпускники не научатся работать с приборами, с которыми они могут столкнуться на производстве. Поэтому использовать виртуальные стенды нужно в случаях, когда это необходимо, понимая, что они обладают как рядом преимуществ, так и рядом ограничений. Та же самая выгрузка результатов может осуществляться на аппаратном уровне. Достаточно иметь сетевой шлюз. Виртуальная лаборатория может быть дополнением реальных лабораторных стендов. Например, при выполнении одной лабораторной работы несколькими группами возникают сложности. Лаборатория, в которой расположен стенд, оснащена компьютерной техникой. Это позволит разработать и установить на компьютеры модель лабораторного стенда, распараллелить группы, выполняющие одинаковую работу.

Как указывалось, лаборатория оснащена приборами ПО «ОВЕН», которое выпускает контроллеры с возможностью программирования их в среде CoDeSys. Это и явилось определяющим фактором при выборе среды программирования. Программирование осуществлялось на языке CFC, который является дальнейшим развитием языка FBD. Этот язык был специально создан для проектирования систем управления непрерывными технологическими процессами [13–15].

Разработка виртуального лабораторного стенда началась с определения числовых параметров виртуального лабораторного стенда (рис. 3). Были определены параметры емкости, в которую поступает жидкость: объем 50 л, высота 50 см, длина основания 50 см, ширина основания 20 см.



а)



б)

Рис. 2. Лабораторный стенд по измерению расхода и уровня жидкости:
а) фото стенда в лаборатории, б) структурная схема стенда

Для лабораторной работы по измерению уровня жидкости ёмкостным уровнемером были определены время наполнения бака, расход жидкости при наполнении бака и сливе жидкости из бака: время наполнения бака, которое определено с учетом оптимизации времени выполнения лабораторной работы, 100 с; расход жидкости при наполнении бака 0,5 л/с; расход при сливе жидкости из бака 0,5 л/с; исходя из вышеуказанных параметров, был посчитано, что за 1 мс уровень жидкости в баке увеличивается на 0,005 мм; для лабораторной по измерению расхода, расход жидкости устанавливается на лабораторном стенде.

Виртуальный лабораторный стенд объединяет две лабораторные работы и включает:

1. Бак, который наполняется жидкостью.
2. Уровнемерное стекло, которое служит действительным показателем уровня жидкости в баке.
3. Уровнемерный комплект, состоящий из чувствительного элемента ёмкостного уровнемера и вторичного прибора с показывающим экраном.
4. Расходомерный комплект, состоящий из поплавкового расходомера и вторичного прибора с показывающим экраном.
5. Два вентиля подачи жидкости в бак и один вентиль слива жидкости из бака.
6. Насос для подачи жидкости в установку.
7. Трубопроводы.
8. Тумблер для задания лабораторной работы.
9. Секундомер.
10. Кнопка включения/выключения автоматического режима.

Для начала работы с виртуальным стендом необходимо:

1. Включить насос подачи воды в установку. Для этого необходимо нажать левой

кнопкой мыши на изображение насоса, находящееся в левом верхнем углу виртуального стенда. Индикатором включения насоса служит изменение его цвета на зеленый и поступление воды в установку, что также отображается изменением цвета доступной для жидкости части трубопровода.

Графическому элементу «Насос» соответствует булева переменная проекта NASOS. Пока насос не включен, т.е. NASOS = FALSE, программа не позволит выполнять никаких других действий по эксплуатации стенда. Данное свойство настраивается в конфигурации графических элементов [13–15], составляющих стенд.

2. После того как насос включен, необходимо тумблер переключить в то положение, которое соответствует выполняемой лабораторной работе: лабораторная работа № 6 «Измерение расхода» либо лабораторная работа № 15 «Измерение уровня». Одновременное включение обоих параметров недоступно. Активное положение тумблера характеризуется зеленым цветом, неактивное – красным. Положениям тумблера соответствуют булевы переменные проекта LR6 и LR15.

После того как активировано одно из положений тумблера – лабораторная работа № 6 или лабораторная работа № 15 – включается соответствующий измерительный комплект, и установка считается подготовленной для выполнения лабораторной работы.

Вентилю подачи воды во время выполнения лабораторной работы № 6 соответствует булева переменная проекта VENTIL_3. Вентилю слива воды из бака соответствует булева переменная VENTIL_2. Значения секундомера хранятся в переменной P_T типа TIME. Значения расхода – в переменной Q типа REAL.

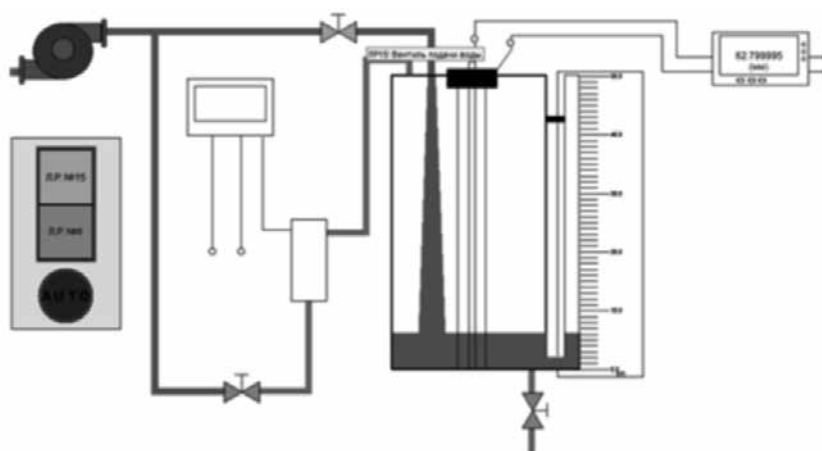


Рис. 3. Виртуальный лабораторный стенд в ходе выполнения лабораторной работы по измерению уровня жидкости ёмкостным уровнемером

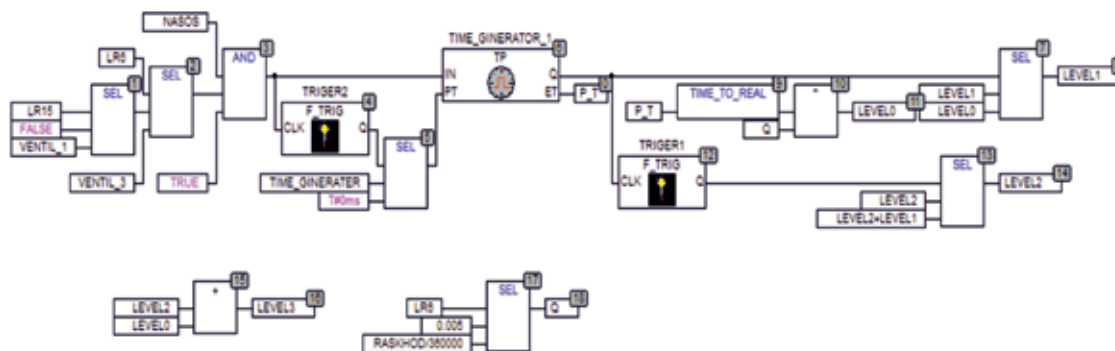


Рис. 4. Код программы, программирующий подачу жидкости в бак



Рис. 5. Код программы, реализующий прерывания изменения уровня

Вентилю подачи воды во время выполнения лабораторной работы № 15 соответствует булевая переменная проекта VENTIL_1. Значения уровня хранятся в переменной L типа REAL. Код программы, отвечающий за работу установки по наполнению бака жидкостью до определенного уровня и с определенным расходом, представлен на рис. 4.

Также программой предусмотрено остановка работы насоса в том случае, если уровень жидкости больше 500 мм. И автоматическое закрытие вентилей слива жидкости, когда её уровень опускается до 0 мм. Реализация данных функций в коде программы представлена на рис. 5.

Разработанный виртуальный лабораторный стенд включает все элементы и выполняет все функции реального лабораторного стенда. Стенд дополнили автоматическим режимом, так как выбранная среда программирования CoDeSys специализируется на прикладном программировании программируемого логического контроллера (ПЛК), была поставлена задача перенести программу после завершения на ПЛК и дополнить ей реальный лабораторный стенд.

Автоматический режим предполагает, что при выборе на лабораторном стенде номера лабораторной работы и нажатии кнопки включения автоматического режима «AUTO», все действия на лабораторном стенде будут выполняться автоматически.

Водяной насос при автоматическом режиме включается автоматически, также включается вентиль подачи воды. Вентиль подачи воды остается в открытом положении

10 с, после этого он автоматически закрывается на 30 с. В это время пользователь снимает показания с уровнемерного стекла и с экрана емкостного уровнемера.

По истечении 30 с вентиль подачи воды снова открывается. Такой цикл повторяется до тех пор, пока уровень в баке не достигнет максимального: 500 мм. Когда уровень в баке достигает верхнего предела, насос и вентиль подачи воды автоматически выключаются.

Далее лабораторная работа выполняется автоматически при обратном ходе. Автоматически открывается вентиль слива воды, и уровень воды в емкости начинает уменьшаться. Вентиль слива воды остается в открытом состоянии 10 с после истечения этого времени он автоматически закрывается на 30 с. В это время пользователь снимает показания с уровнемерного стекла и экрана емкостного уровнемера. Затем вентиль слива воды снова открывается, и такой цикл происходит, пока уровень в баке не достигнет 0 мм. Когда уровень в баке достигает нижнего предела, вентиль слива воды выключается, выполнение лабораторной работы завершается. Для того чтобы заново начать выполнение лабораторной работы № 15 в автоматическом режиме, необходимо повторно нажать на кнопку «AUTO». Графическому элементу кнопке «AUTO» соответствует булевая переменная проекта AUTO_MODE.

Код программы, отвечающий за включение автоматического режима и выполнение лабораторной работы при прямом ходе, представлен на рис. 6.

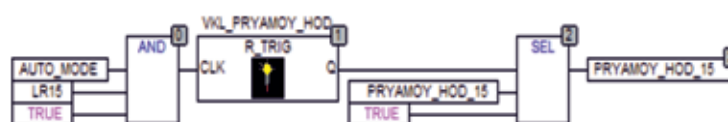


Рис. 6. Код программы, отвечающий за включение автоматического режима выполнения работы

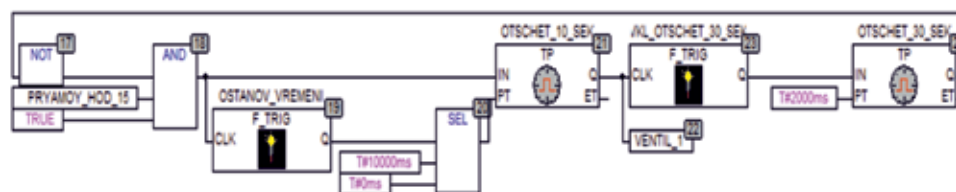


Рис. 7. Код программы, реализующий выполнение работы при прямом ходе

Представлена часть программы, реализующая выполнение лабораторной работы № 15 при прямом ходе в автоматическом режиме (рис. 7). Часть кода для автоматизации выполнения лабораторной работы на виртуальном лабораторном стенде выступает в качестве надстройки к основному коду.

Настройка ПЛК осуществлялась в среде CoDeSys. В режиме настройки и отладки (в среде программирования это режим эмуляции), студентам предоставляется возможность изменить настройки и посмотреть, как это влияет как на работоспособность самой программы, так и на выходные параметры. Такая «тренировка» позволит будущим специалистам овладеть базовыми навыками программирования на языке SFC.

Как было показано выше, лабораторный виртуальный стенд может работать в двух режимах (ручном и AUTO).

В автоматическом режиме лабораторные работы выполняются без необходимости управления и контроля виртуальным стендом. Выполнение лабораторных работ в автоматическом режиме позволит студентам ознакомиться с работой ПЛК.

Заключение

Таким образом, виртуальный лабораторный стенд в настоящее время, когда, казалось бы, дистанционный режим обучения совсем недавно был преобладающим, а актуальность такого рода разработок достаточно высока, является незаменимым помощником при проведении лабораторных занятий. Кроме того, виртуальный стенд может заменить реальный при его поломке, но только в плане непрерывного проведения образовательного процесса, так как возможность непосредственного контакта студентов с реальными приборами является

определяющим фактором, позволяющим приобретать необходимые навыки работы с контрольно-измерительными приборами.

Аналогичные виртуальные стенды в рамках создания цифрового двойника лаборатории СУХТП планируется разработать для всех стендов лаборатории. Практическая актуальность внедрения цифровых двойников обуславливается возможностью значительного повышения эффективности образовательного процесса.

Список литературы

1. Шпак П.С., Сычева Е.Г., Меринская Е.Е. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2020. Т. 18. № 1. С. 57–68.
2. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. MES – основа для создания «цифрового двойника» производственной системы // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 2 (49). С. 52–56.
3. Шинкевич А.И., Нургалиев Р.К. Особенности управления нефтехимическим производством в индустрии 4.0 // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 3. С. 119–124.
4. Поспелова Т.А., Стрекалов А.В., Князев С.М., Харитонов А.Н. Реализация цифровых двойников для управления газовым промыслом // Сетевое научное издание «Нефтяная провинция». 2020. № 1 (21). С. 242–230.
5. Долгов В.А., Кабанов А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия // Автоматизация и современные технологии. 2018. № 4. С. 178–184.
6. Лауар С., Делов М.И., Литвинцова Ю.Е., Кузьменков Д.М., Мурадян К.Ю., Навасардян М.В., Куценко К.В. Теплогидравлический стенд для разработки новых решений в области использования цифровых двойников объектов атомной энергетики // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020. № 2. С. 122–134.
7. Коноваленко Д.В. Система поддержки принятия решений при подготовке нефти с использованием цифрового двойника технологической установки // Моделирование, оптимизация информационные технологии. 2020. № 8 (1). С. 1–9.
8. Вихман В.В., Ромм М.В. «Цифровые двойники» в образовании: перспективы и реальность // Журнал Высшее образование в России. 2021. Т. 30. № 2. С. 22–32.

9. Трухин А.В. Виды виртуальных компьютерных лабораторий // Инновационные технологии в высшем образовании. 2005. С. 58–67.
10. Черемисина Е.Н., Антипов О.Е., Белов М.А. Роль виртуальной компьютерной лаборатории на основе технологии облачных вычислений в современном компьютерном образовании // Дистанционное и виртуальное обучение. 2012. № 1. С. 53–60.
11. Саданова Б.М., Олейникова А.В., Альберти И.В., Одинцова Е.А., Плеханова Е.Н. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза // Молодой ученый. 2016. № 4. С. 71–74.
12. Перухин М.Ю., Урываев Е.В. Разработка виртуального стенда для изучения управления периодическими процессами // Вестник технологического университета. 2016. № 21. Т. 19. С. 154–156.
13. Кадырова Г.К., Подрядова Д.Ю., Яруллина Л.И., Перухин М.Ю. Разработка виртуального лабораторного стенда в среде CODESYS: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (27–28 мая 2019 г.). Пенза, 2019. С. 268–271.
14. Перухин М.Ю., Кадырова Г.К. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Измерение уровня и расхода жидкостей» № 2021611267. Дата государственной регистрации 25.01.2021 г.
15. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. проф. В.П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.