САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР

по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова

28 сентября 2023

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А. А. Вавилова

28 сентября 2023

Санкт-Петербург
2023

УДК 681.5(08)

Библиографическое описание

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, посвященная 100-летию со дня рождения ученого. Ежегод. журн. / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. 57 с. – Режим доступа к журн.: – https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2023/sbornik.pdf – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7629-3255-4

ISBN 978-5-7629-3255-4

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023

Разработка методики синтеза нечеткой модели управления и диагностики процесса транспорта газа

Д. М. Лосева
ООО «Газпром переработка»
Санкт-Петербург, Россия
d.m.loseva@gmail.com

М. Ю. Шестопалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
shestopalov_08@mail.ru

***Аннотация*. В статье предлагается методика синтеза нечеткой модели управления и диагностики процесса транспорта газа на основе типового модуля, построенного на принципах нечеткой логики. В результате строится отказоустойчивая система управления, организованная по иерархическому принципу. Показывается место для решения задач диагностики и обеспечения отказоустойчивости в структуре АСУ ТП. Отличительными преимуществами отказоустойчивых систем являются адаптированные к конкретным задачам отказоустойчивые архитектуры, качество структурных решений, обеспечение высоких качественных показателей современных технических систем ответственного назначения, их высокая надежность, безопасность и живучесть, высокий уровень безотказности, бесперебойность и непрерывность работы систем при возникновении неисправностей, возможно с некоторым ухудшением качества функционирования, и более продолжительная эксплуатация, обеспечение качества выпуска конечной продукции, возможность перераспределения управления на исправные органы, долгий срок жизни системы. Методика синтеза нечеткой модели управления и диагностики объекта формализована на базе методологии последовательного раскрытия неопределенности. В результате получается модель в виде графа. Особенностью данного графа является абсолютная ясность, за что отвечает каждая вершина графа, и как устанавливаются связи между вершинами с точки зрения реализации механизмов нечеткого логического вывода. В работе представлен фрагмент упрощенной модели иерархической системы нечеткого управления и диагностики, описывающий уровень компрессорной станции, одного из ее цехов и одного из газоперекачивающих агрегатов, входящих в состав данного цеха. В рамках данного фрагмента описывается реализация логико-командного управления на основе нечеткой логики на станционном уровне для реализации загрузки компрессорной станции в ее типовой режим работы «Магистраль» и вывода ее из «Магистрали» в разные режимы холодной рециркуляции, показаны задачи, которые могут быть решены методами нечеткого управления.**

Ключевые слова: отказоустойчивая система управления, диагностика, типовой модуль нечеткого управления, иерархическая структура системы управления, методология последовательного раскрытия неопределенности, нечеткий граф модели управления

I. Моделирование и управление процессом транспорта газа

Анализ литературы [1] по вопросам моделирования и управления процессом транспорта газа позволяет сделать следующие выводы:

1. На текущий момент общеупотребительных математических моделей процесса транспорта газа нет.
2. Есть некоторые частные модели процессов транспорта газа, неадаптированные к условиям эксплуатации.
3. Следует отметить сильную зависимость используемых подходов к автоматизации от опыта эксплуатации оборудования, эмпирических правилах и практических рекомендаций эксплуатационников [2].
4. При проектировании используется схема «снизу-вверх» от решения частных задач управления и диагностики на нижнем уровне до более высоких уровней автоматизации и этот процесс носит достаточно хаотический характер. В результате наблюдается большое количество разных подходов к решению задач управления и диагностики, недостаточная их типизация, унификация и стандартизация [3].

II. Отказоустойчивые системы управления

Отказоустойчивые системы управления строятся по иерархическому принципу (рис. 1).

Первые три уровня – это типовой проект АСУ ТП [4–5]. На первом уровне размещаются датчики и исполнительные устройства. Второй и третий уровень предназначен для решения задач локального и централизованного контроля и регулирования.

Технические средства, которые делают систему управления отказоустойчивой в рамках данной иерархии, располагаются на четвертом уровне.

Рис. 1. Иерархическая среда функционирования системы управления

Отличительными преимуществами отказоустойчивых систем являются адаптированные к конкретным задачам отказоустойчивые архитектуры, качество структурных решений, обеспечение высоких качественных показателей современных технических систем ответственного назначения, их высокая надежность, безопасность и живучесть, высокая безотказность, бесперебойность и непрерывность работы системы при возникновении неисправностей, возможно с некоторым ухудшением качества функционирования, и более продолжительная эксплуатация, обеспечение качества выпуска конечной продукции, возможность перераспределения управления на исправные составляющие, долгий срок жизни системы.

В настоящий момент не существует абсолютно отказоустойчивой системы управления, но такая система является своего рода идеалом, к которому нужно стремиться. И одним из ключей, которые могут открыть дверь на пути к идеалу, является сознательное введение в систему избыточности, т. е. создание определенных запасов или резервов. Идея введения избыточности для повышения надежности, отказоустойчивости системы принадлежит Джону фон Нейману и была сформулирована в 1950-х годах. Особенно интересным в плане введения избыточности представляется использование принципа функционального резервирования. Под функциональным резервированием понимается не только аппаратная избыточность, т.е. резервирование аппаратных средств. Функциональное резервирование рассматривается значительно шире: как применение аналитической и структурной избыточности. С точки зрения обеспечения отказоустойчивости здесь предлагается решение на основе построения резервных контуров управления, которые могут обеспечить максимальную надежность системы при заданном наборе неисправностей.

Выделяют следующие типы избыточности:

- аппаратная (резервирование);
- программная;
- аналитическая (диагностика и реконфигурирование/реструктуризация регуляторов в реальном масштабе времени);
- информационная (дублирование накопленных исходных и промежуточных данных);
- временная избыточность (резервы времени на коррекцию ошибок).

Развитие принципов отказоустойчивого управления обусловлено усложнением технических систем, а также повышением требований к их безопасности и надежности. Классические замкнутые контуры управления на основе принципа управления по отклонению для сложного технического объекта могут привести к неудовлетворительному качеству или даже неустойчивости при отказах в приводах, датчиках и других компонентах системы.

Система отказоустойчивого управления является системой управления, обеспеченной интеллектуальной надстройкой, обеспечивающей выполнение объектом управления своих функций при возникновении неисправностей.

Различают структурный, алгоритмический и системный подход к обеспечению отказоустойчивости. Как раз системный подход и порождает в общем случае иерархическую двухуровневую структуру отказоустойчивой системы. Первый уровень управления может иметь свою внутреннюю иерархию, как например, в АСУ ТП, и решает традиционную задачу синтеза системы управления по методикам классической теории управления [6]. Цель второго уровня управления, называемого интеллектуальной надстройкой, заключается в обеспечении работоспособности основной системы управления первого уровня иерархии при возникновении неисправности.

Если возникшая неисправность может быть компенсирована изменением параметров регулятора основной системы или формированием определенного дополнительного сигнала управления, то решается задачи параметрических или сигнальных подстроек. Для некомпенсируемых отказов решают задачи реконфигурации/реструктуризации алгоритмов или аппаратуры в зависимости от места локализации отказа и имеющейся избыточности.

Повышение качества информационных технологий мониторинга состояния технических систем и управления ими, в настоящее время возможно при использовании и внедрении методов и алгоритмов интеллектуализации процессов сбора и обработки информации, принятия решений, управления на основе интеллектуального анализа данных, которые обеспечивают повышение качества идентификации состояния технической системы и корректную компенсацию воздействия на техническую систему различных неисправностей.

III. Типовой модуль нечеткого управления

Современный подход к интеллектуализации управления на разных иерархических уровнях системы «ГПА-КЦ-КС» (газоперекачивающий агрегат – компрессорный цех – компрессорная станция) естественным образом приводит к необходимости разработки типового модуля для систем управления и диагностики технологического процесса транспортировки газа.

Так как в рамках данного подхода комбинируется количественная и качественная информация, то целесообразно для решения этой задачи использовать математический аппарат нечеткой логики.

Применение fuzzy-технологий для исследуемых систем позволит [7–8]:

- органичным образом применять на практике качественные знания технологов, их опыт, интуицию. Следующим этапом является формирование на этой основе формальные алгоритмов с возможностью их программной или аппаратной реализации;
- описывать алгоритмы логико-командного управления на языке нечеткой логики, предоставляющей большие возможности по сравнению с классической булевой логикой;
- использовать fuzzy-копирование классических стратегий управления (например, ПИД-регуляторов). Это предоставляет возможность оптимизации полученных таким образом нечетких регуляторов в два этапа: замена классических регуляторов эквивалентными нечеткими и последующая их оптимизация за счет появившихся дополнительных степеней свободы при проектировании.

В результате проектирование всех процессов управления и диагностики происходит по единому алгоритму в рамках типового модуля нечеткого управления и диагностики. При этом все координаты технологического процесса делятся на три группы (рис. 2):

1) Управляющие воздействия в форме:

- аналогового вывода для режимов супервизорного управления и прямого цифрового управления;
- дискретного вывода для реализации логико-командного управления;
- нечеткого вывода;
- лингвистического вывода для представления информации в форме более удобной для оператора.

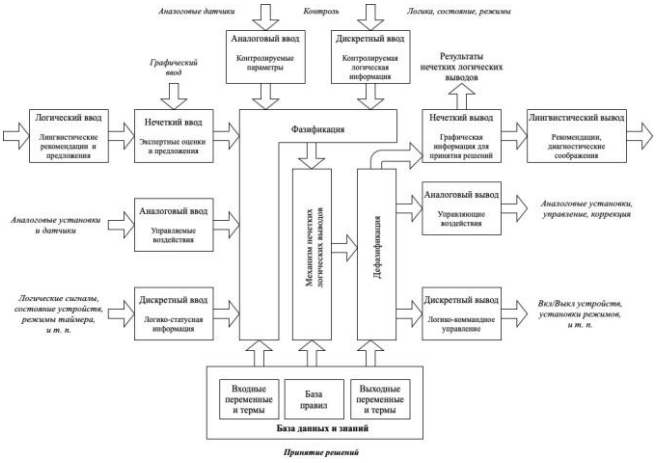


Рис. 2. Профили гидравлического уклона линейного участка МТ

2) Управляемые координаты в форме:

- аналогового ввода (датчики);
- дискретного ввода состояния оборудования;
- нечеткого ввода неопределенной по форме информации;
- лингвистического ввода для перевода информации из разговорной формы в формальную математическую.

3) Контролируемые координаты, важные для технологического процесса, обрабатываемые модулями аналогового и дискретного ввода.

Особенностью модуля является обработка информации по единому алгоритму нечеткого логического вывода:

1. Фазификация.
2. Нечеткий логический вывод по базе правил.
3. Дефазификация.

Учитывая большое число координат, используемых для управления и диагностики процесса транспортировки газа, важным моментом является обеспечение обозримости и удобства работы с базой правил. Для этого целесообразно структурировать всю имеющуюся информацию и оформить ее в виде специализированной базы данных. При этом построение инфологической модели и концептуальной схемы базы данных будет диктоваться спецификой обработки информации в системах на основе нечеткой логики.

Практическая реализация данной концепции может осуществляться в следующем порядке:

1. Разработка прототипа базы знаний на основе продукционных моделей представленных знаний и ее реализация.
2. Наполнение базы данных информацией, отражающей существующую схему управления процессом транспорта газа.
3. Программная реализация модуля нечеткого управления и диагностики.
4. Настройка совместной работы модуля нечеткого управления и диагностики и базы данных для обеспечения эквивалентного качества управления и диагностики существующей системы и новой.
5. Оптимизация качества управления и диагностики, используя в качестве исходной точки оптимизации полученную эквивалентную систему.

IV. Методика синтеза модели управления и диагностики

В отличие от классических подходов синтез нечетких систем управления и диагностики базируется не на количественной математической модели поведения объекта управления в форме «вход (управление) – выход (управляемые координаты)», а на качественной модели управления и диагностик этого объекта, аккумулирующей экспертный опыт практической работы с ним [9]. Очень часто используемые при этом опыт и интуиция подчиняются формуле «Не знаю, как все это происходит, но знаю, как всем этим управлять».

Тем не менее, методику синтеза такой качественной модели управления и диагностики объекта можно формализовать на базе методологии последовательного раскрытия неопределенности в виде следующего алгоритма [10].

1. Функционально-целевой анализ (ФЦА) автоматизируемого технологического процесса, результатом которого должен быть перечень входных и выходных координат (вершин графа), позволяющих обеспечить управляемость, наблюдаемость и диагностируемость процесса, а также стратифицированный список всех подлежащих решению задач управления и диагностики. Этот этап реализует подготовку к формированию модели нулевого ранга неопределенности.

2. Формирование модели нулевого ранга неопределенности M(0), представляющей собой совокупность термов (вершины-термы сигнального графа в дополнение к вершинам-координатам, выделенных на этапе ФЦА входных и выходных координат, достаточных для решения задач управления и диагностики на основе нечеткой логики). С точки зрения теории графов – это нуль-граф.

3. Формирование модели первого ранга неопределенности M(1), определяющей топологию качественной модели введением вершин-правил для установления и ориентации связей между входными и выходными координатами и их термами. Таким образом, возникает направленный сигнальный граф, в котором закодирована база правил модуля нечеткого управления и диагностики, определяющая стратегию решения всех задач управления из списка, полученного на этапе ФЦА. Тактические задачи решают вершины графа, представляющие собой термы, описывающие нечеткие множества. Настройка параметров этих термов решает задачу «тонкой оптимизации» модели.

4. Формирование модели второго ранга неопределенности M(2), задающей структуру качественной модели управления и диагностики объекта и определяющей характер обработки нечеткой информации в вершинах различного типа. Для вершин термов необходимо задать форму термов (треугольник, трапеция, Singleton и т. д.), для вершин правил определить схему реализации нечетких логических операторов «И», «ИЛИ», механизм нечетких логических выводов (max-min, max-prod и т. п.), для вершин термов выходных величин необходимо выбрать метод дефазификации. Этот этап принято называть этапом настройки структуры нечеткой системы управления и диагностики.

5. Формирование модели третьего ранга неопределенности M(3), определяющей параметры качественной модели и обеспечивающей ее настройку на конкретный технологический процесс. Ключевую роль на этом этапе «тонкой оптимизации» играет выбор параметров функций принадлежности и размещение их по области допустимых значений изменения переменных. Также возможно использование приоритетов важности правил при дефазификации. В результате получается граф со структурой, представленной на рис. 3. Особенностью данного графа является абсолютная ясность, за что отвечает каждая вершина графа, и как устанавливаются связи между вершинами.

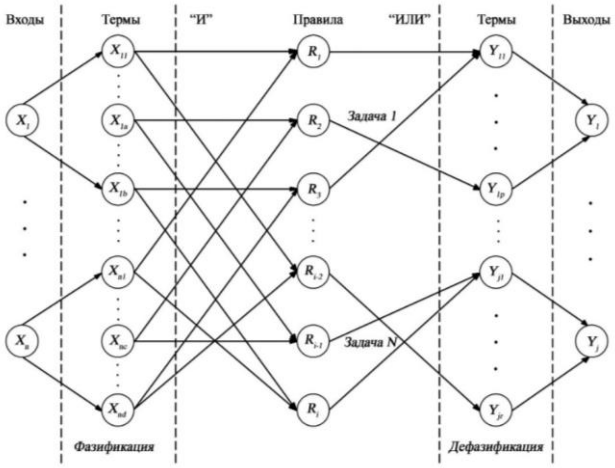


Рис. 3. Схематичное изображение трубопровода с обнаруженными дефектами

В соответствии с разработанной обобщенной схемой комплексной системы управления, построенной по иерархическому принципу «станция – цех –агрегат», логично использовать ее в виде корневой структуры для декомпозиции процесса управления с целью синтеза структуры модуля нечеткого управления и диагностики процесса транспорта газа.

В упрощенном виде элементы этой корневой структуры представлены на рис. 4. При реализации технического проекта модуля нечеткого управления и диагностики для конкретного процесса транспорта газа эта схема должна быть представлена со степенью детальности, необходимой и достаточной для управления и диагностики процесса с точки зрения реализующего процесс персонала, чей опыт и знания должны быть аккумулированы в модуле нечеткого управления и диагностики [11].

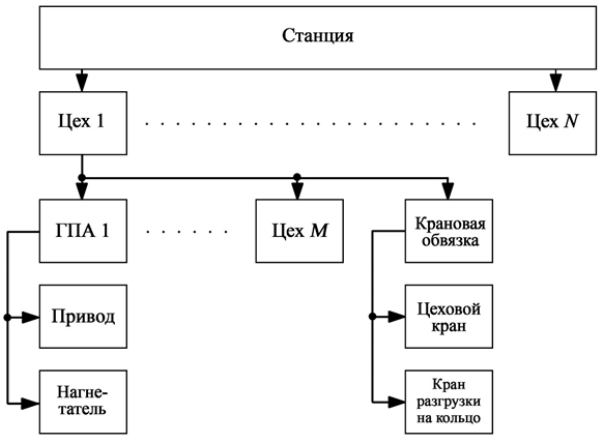


Рис. 4. Корневая структура для декомпозиции процесса управления

Для оценки степени сложности итоговой модели на рис. 5, представлен фрагмент упрощенной модели иерархической системы нечеткого управления и диагностики, описывающий уровень компрессорной станции, одного из ее цехов и одного из газоперекачивающих агрегатов, входящих в состав данного цеха.

В рамках данного фрагмента описывается реализация логико-командного управления на основе нечеткой логики на станционном уровне для реализации загрузки компрессорной станции в ее типовой режим работы «Магистраль» и вывода ее из «Магистрали» в разные режимы холодной рециркуляции, показаны задачи, которые могут быть решены методами нечеткого управления.

Разработка подобной модели в полном объеме является самостоятельной задачей и позволяет сформировать исходную информацию для наполнения базы знаний. Практическая реализация такого подхода позволит ввести систему унифицированных решений для класса объектов, спецификация которых будет достигаться путем обобщения знаний экспертов, учета особенностей конкретных объектов и условий их эксплуатации [12]. Таким образом, в систему управления и диагностики вносятся уникальные нечеткие представления [13], которые обычно содержатся в технологических регламентах и других документах.

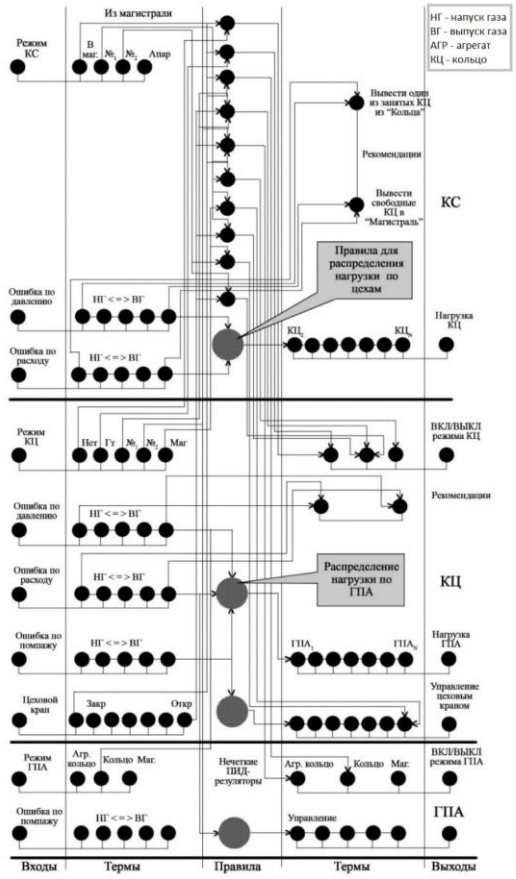


Рис. 5. Фрагмент модели иерархической системы нечеткого управления и диагностики

V. Заключение

В данном докладе предлагается концепция реализации управляемых и диагностируемых процессов по единому алгоритму нечеткого управления и диагностики, реализуемого в составе типового модуля нечеткого управления и диагностики.

В соответствии с разработанной обобщенной схемой комплексной системы управления, построенной по иерархическому принципу «станция – цех – агрегат», эта схема используется в виде корневой структуры для декомпозиции процесса управления с целью синтеза модели иерархической системы нечеткого управления и диагностики, описывающий уровень компрессорной станции, одного из ее цехов и одного из газоперекачивающих агрегатов, входящих в состав данного цеха.

Список литературы

[1] Балавин М.А., Продовиков С.П., Шайхутдинов А.З. и др. Автоматизация процессов газовой промышленности / Под общей редакцией А.З. Шайхутдинова и др. СПб: Наука, 2003. 496 с.

[2] Заливин В. Г., Вахромеев А.Г. Аварийные ситуации в бурении на нефть и газ: учебное пособие. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Москва; Вологда: «Инфра-Инженерия», 2018. 506 с.

[3] Кораблев Ю.А., Лосева Д.М., Шестопалов М.Ю. Концепция эволюционного синтеза современных сложных систем управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Том 15, № 4. С. 29-34.

[4] Шишов О.В. Современные средства АСУ ТП. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021. 532 с.

[5] Алексеев М.В., Попов А.П. Проектирование автоматизированных систем: учебное пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2020. 156 с.

[6] Зубкова Т.М. Построение системы автоматизированного проектирования технологических объектов. СПб: Изд-во «Лань», 2023. 264 с.

[7] Зак Ю. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных. Fuzzy-технологии. М.: Изд-во «Ленанд», 2016. 352 с.

[8] Флегонов А.В., Вилков В.Б., Черных А.К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных: монография. СПб: Издательство «Лань», 2020. 332 с.

[9] Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю., Яковлев В.Б. и др. Современная прикладная теория управления. Ч.3 / под ред. А.А. Колесникова. Центр «Интеграция». М.–Таганрог: Изд-во ТГРУ, 2000. 580 с.

[10] Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Эволюционный синтез систем управления. Л.: ЛЭТИ, 1983, 80 с.

[11] Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х., Кораблёв Ю.А., Квашнин С.В. Проектирование систем управления территориально распределёнными объектами // Инновации. 2018. № 10. С. 100-107.

[12] Кораблев Ю.А. Проектирование гибридных интеллектуальных систем отказоустойчивого управления. СПб: Изд-во Печатный Цех, 2019. 156 с.

[13] Феликс Ланге. Нечеткая логика. СПб: Изд-во: Страта, 2018 г. 116 с.

Обобщенная структура отказоустойчивого управления технологическими системами транспорта газа

Д. М. Лосева
ООО «Газпром переработка»
Санкт-Петербург, Россия
d.m.loseva@gmail.com

***Аннотация*. Рассматриваются вопросы структурной организации современных технологических систем транспорта газа. В статье предлагается обобщенная структура отказоустойчивого управления, ее реализация на основе технологии «цифровых двойников». Технология «цифрового двойника» хорошо вписывается в идеологию построения интеллектуальных отказоустойчивых систем управления. Благодаря усилению роли и важности задач проектирования, стремительному развитию технологий поддержки проектирования, таких как компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг, интернет вещей, машинное обучение, большие данные и искусственный интеллект, цифровые двойники претендуют на ключевую роль в IV промышленной революции. Фундаментальной особенностью цифрового двойника является оптимизация эффективности технической системы на основе оперирования актуальными данными, получаемыми с реального объекта. Эти данные получают и анализируют в ходе измерений параметров технической системы в реальном мире. Основой цифрового двойника в статье является Simulink-модель технической системы, актуализируемая данными, получаемыми от реального объекта. Параллельно с работой реального объекта решаются задачи диагностики и обеспечения отказоустойчивости при моделировании на основе данной Simulink-модели. Результаты решения этих задач – диагнозы неисправностей и параметры реконфигурации/реструктуризации регуляторов – передаются из виртуальной среды цифрового двойника реальному объекту. В статье также детально показывается, как решаются задачи обеспечения отказоустойчивости технологических систем транспорта газа. Дается перечень учитываемых при проектировании стандартов. Рассматриваются вопросы автоматизации газотранспортного оборудования на уровне компрессорной станции, компрессорного цеха, газоперекачивающих агрегатов. Делается вывод, что является логичным, в русле современных тенденций, строить структуру отказоустойчивых систем управления на уровне управления технологическим процессом на принципах супервизорного управления.**

Ключевые слова: отказоустойчивая система управления, диагностика, цифровой двойник, супервизорное управление, современная технологическая система, транспортировка газа, цифровизация

I. Введение

Современная технологическая система (ТС) – это единая система технологических объектов (ТО) для переработки взаимосвязанных материальных, энергетических и информационных потоков, реализующая определенную последовательность технологических процессов (ТП), обеспечивающих достижение заданной конечной цели производства.

Технологические системы – это большие системы, для которых характерны:

- общая цель функционирования;
- большое количество элементов и большое количество параметров, их описывающих;
- сложность поведения;
- наличие внешних неконтролируемых воздействий;
- неопределенность параметров.

Для обеспечения безопасной работы промышленных систем в различных ситуациях необходимо разрабатывать стратегию, математические модели, методы и алгоритмы оценки состояний и диагностики процесса, методы и алгоритмы принятия решений, использовать при проектировании наряду с классическими методами искусственного интеллекта (нейронные сети, нечеткую логику).

II. Обеспечение отказоустойчивости ТС

Мероприятия по обеспечению отказоустойчивости [1], безотказной работы технологического процесса при создании системы управления технологическими объектами должны закладываться на всех стадиях проектирования, начиная со сбора и формализации требований, подготовки данных, разработки концепции, формирования технического задания.

Процесс проектирования предполагает обязательный учет современных стандартов:

- ГОСТ 34-ой серии (стандарты на автоматизированные системы);
- ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов»;
- ГОСТ Р МЭК 61508-4-2007 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью»;
- международный стандарт «Исследование факторов опасности и работоспособности». Другое название стандарта «HAZOP» (Hazard and Operability Study);
- SIL-анализ (Safety Integrity Level). Устанавливает класс надежности оборудования. Требуется

сертификация признанным международным экспертным агентством, например, TUV (Technischer Uberwachungsverein);

- международный стандарт IEC 61508.

В совокупности учет вышеперечисленных стандартов помогает минимизировать возникновение неисправностей, вплоть до аварийных ситуаций, риски эксплуатации оборудования.

Главной задачей при разработке проекта автоматизации является выбор структуры системы управления и средств контроля технологического процесса [2].

III. Автоматизация газотранспортного оборудования

В задаче автоматизации газотранспортного оборудования можно выделить следующие подзадачи: управления основным и вспомогательным оборудованием (основные и вспомогательные функции управления), контроля, информационного обеспечения, диагностики. К подзадаче управления основным оборудованием можно отнести управление собственно процессами транспортировки газа. Вспомогательные функции управления связаны с подсистемами, обеспечивающими работу основного оборудования, например, бесперебойное снабжение топливным газом двигателей газоперекачивающего агрегата (ГПА), маслоснабжение и т. д.

Функции контроля обеспечивают выполнение функций управления путем измерения необходимых координат состояния. Назначение информационных функций – сбор информации о технологических процессах, ее отображение оператору. Функции диагностики включают в себя диагностику технического состояния системы и имеют прямой выход на решение задач обеспечения отказоустойчивости.

Основные функции управления (рис. 1) можно сформулировать следующим образом:

- управление КЦ и КС;
- управление нагрузкой ГПА в соответствии с их характеристиками и выбранным критерием оптимальности;

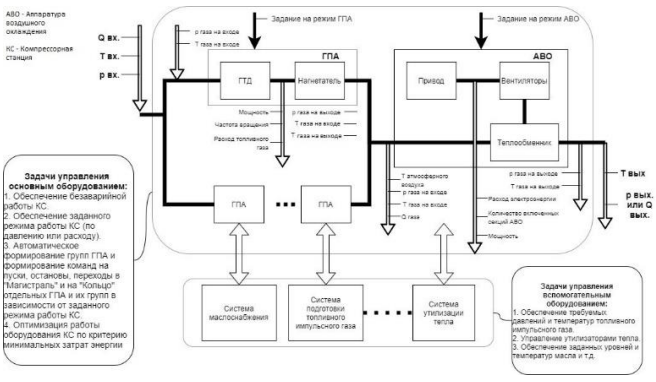


Рис. 1. Компрессорная станция как объект управления

- антипомпажное регулирование;
- диагностика;
- автоматическая защита по частоте вращения ротора силовой турбины;
- регулирование (стабилизация) частоты вращения силового вала;
- автоматическое регулирование (ограничение) и контроль предельных значений частоты вращения ротора;
- автоматическое регулирование (ограничение) и контроль предельных значений давления и температуры;
- антипомпажное управление за счет:
  - обеспечения устойчивой работы нагнетателя на линию рециркуляции за счет вывода нагнетателя из потенциально опасной зоны;
  - устранения необратимого помпажа путем закрытия входного крана, так называемый аварийный останов;
- управление механизмами и устройствами защиты.

Следует обратить внимание, что большинство основных функций управления, перечисленных ниже, связано с диагностикой.

Вспомогательные функции регулирования:

- давления всех видов используемого газа;
- выходной температуры газа на уровне КЦ и КС;
- уровней и температуры в масла;
- температуры и давления утилизируемого тепла.

Функции контроля:

- централизованный контроль измеряемых параметров и состояния оборудования агрегатов;
- контроль отклонений параметров ГПА и вспомогательного оборудования от заданных предельных значений;
- по состоянию системы механизации должен обеспечиваться контроль:
  - положения лопаток компрессора газогенератора;
  - положения всех клапанов перепуска воздуха;
- контроль состояния стопорного клапана и положения топливного регулирующего клапана.

Информационные функции:

- представление основных технологических параметров на дисплее пульта оператора, например, температуры газа, частоты вращения, контроль перепада давления «масло-газ», и положений исполнительных механизмов;
- обнаружение, отображение и сигнализация в автоматическом режиме отклонений технологических параметров от заданных предельных значений;
- представление информации о выполнении предпусковых условий;

- представление информации о выполнении автоматических проверок защиты;
- сигнализация режимов работы агрегата;
- запоминание аналоговых параметров и дискретных сообщений при аварийных остановах;
- индикация неисправностей цепей управления исполнительными механизмами;
- сохранение значений аналоговых параметров на заданном промежутке времени.

Функции диагностики:

- контроль управляющих таймеров (запуск ГТУ, выбега роторов);
- борьба с вибрациями;
- контроль реализации функций управления и регулирования системы управления, модулей и блоков системы управления;
- контроль (непрерывный или периодический) неисправностей цепей дискретных и аналоговых датчиков, исполнительных механизмов, аварийных защит;
- отображение на дисплее пульта оператора сообщений об отказах.

IV. Обобщенная структура системы управления

Общепринятой организационной структурой компрессорной станции является компрессорный цех. Именно цеховой уровень является следующим по иерархии агрегатным уровнем. А основной структурной единицей компрессорного цеха является ГПА.

В цепи «КС-КЦ-ГПА» можно считать, что ГПА – это исполнительный механизм КС, обеспечивающий основные преобразования энергии для сжатия газа. ГПА имеет исполнительные механизмы, управление которыми осуществляется блоком формирования режимов с использованием базы правил, хранящей знания инженера-технолога. Аналоговые исполнительные механизмы (дозатор топлива газотурбинного привода, байпасный (антипомпажный) клапан нагнетателя и т. д.) управляются согласованными друг с другом программными задатчиками и регуляторами различной природы.

Технологические условия требуют реализации совместного управления состоянием газа и нагрузкой через систему отказоустойчивого управления, обеспечивающего управление подсистемами и их реконфигурирование в случае возникновения неисправностей. Управление состоянием реализуется через подвод мощности к нагнетателю при помощи приводного двигателя. Управление двигателем реализуется через количество подаваемого топлива с целью поддержания (изменения) необходимой частоты вращения вала (рис. 2). Управление нагрузкой осуществляется при помощи логико-командного управления технологическими кранами.

Особенности взаимного влияния нагнетателя и нагрузки могут привести к появлению режима, называемого помпажем. Помпаж – неустойчивая работа компрессора, которая может привести к выходу оборудования из строя.

С помпажем борются путем перепуска газа с выхода на вход компрессора. Элементами антипомпажного регулирования и защиты являются антипомпажные клапаны. В силу этого, в функции управления процессом компримирования необходимо ввести специальное управление, обеспечивающее антипомпажные свойства процесса компримирования. Реализация этого управления осуществляется через косвенное изменение свойств нагрузки воздействием на байпасный кран.

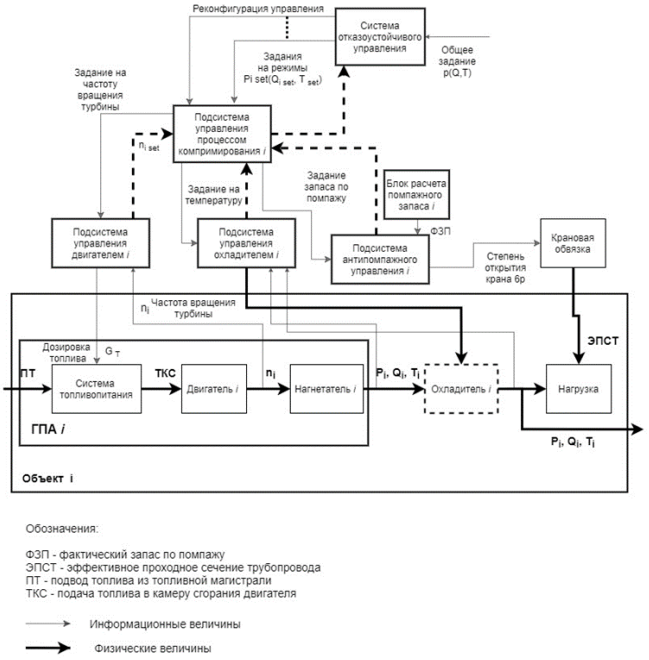


Рис. 2. Обобщенная структура системы управления

Реконфигурирование работы управляющих подсистем происходит по результатам диагностики состояний процесса компримирования в реальном масштабе времени. Как правило, речь идет о перестройке параметров локальных регуляторов или, реже, их реструктуризации.

V. Цифровые двойники

В данной статье предлагается реализация структуры отказоустойчивого управления технологическими системами транспорта газа по технологии «цифровых двойников».

Технология «цифрового двойника» хорошо вписывается в идеологию построения интеллектуальных отказоустойчивых систем управления.

Автор концепции цифрового двойника – профессор Майкл Гривс (Michael Grieves) [3]. Он использовал разные формулировки для описания идеи, которые менялись с течением времени.

В основе концепции – представление системы в виде двух систем – физической и виртуальной с полной информацией о физической системе. При этом происходит постоянное отображение виртуальной системы в реальную и наоборот (рис. 3).

Рис. 3. Основа концепции цифровых двойников Майкла Гривса [4]

Концепция цифрового двойника появилась в начале 2000-х гг., но не нашла практического применения из-за своей сложности и высокой стоимости. Точкой поворота ситуации в лучшую сторону был 2010 год. В результате бурного развития компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга, интернета вещей, машинного обучения, больших данных, искусственного интеллекта цифровые двойники стали претендовать на ключевую роль в IV промышленной революции (рис. 4).

Для обозначения «Цифрового двойника» часто используют родственные понятия типа «Цифровая тень», «Цифровая модель». При этом фундаментальной особенностью цифрового двойника является оптимизация эффективности технической системы на основе оперирования актуальными данными, получаемыми с реального объекта. Эти данные получают и анализируют в ходе измерений параметров технической системы в реальном мире.

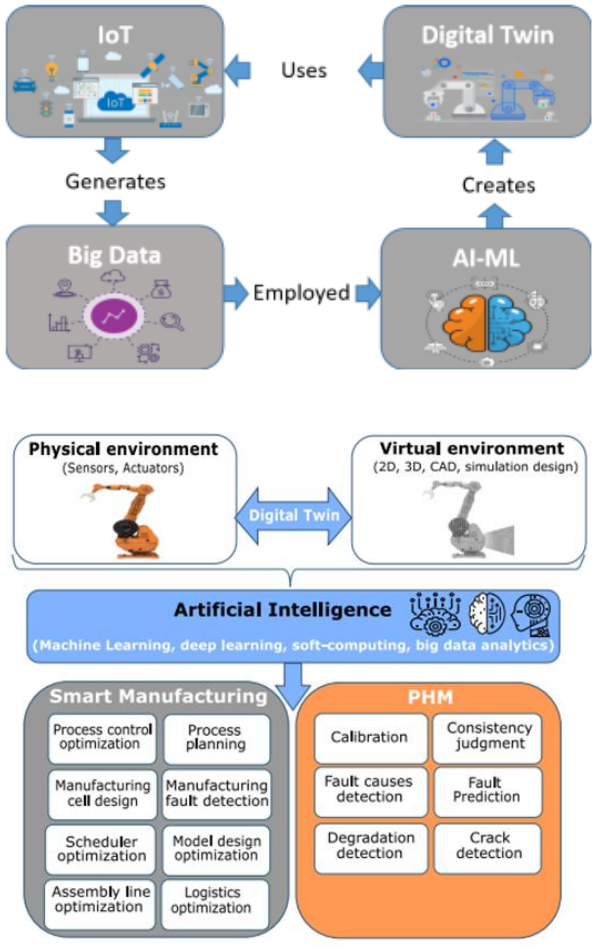


Рис. 4. Связь между интернетом вещей, большими данными, искусственным интеллектом, машинным обучением и цифровыми двойниками [5]

Уровень развития «Цифрового двойника» принято отражать так называемой пирамидой цифровизации (рис. 5).

Рис. 5. Пирамида зрелости цифровизации [6]

Впервые термин «цифровой двойник» появился в книге «Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management» (2011 год). Также авторство этого термина приписывают эксперту NASA Джону Викерсу (John Vickers).

«Цифровые двойники» в настоящее время рассматриваются как часть концепции Индустрия 4.0 для моделирования технических систем в виртуальной среде.

В рамках данной работы разработанная интеллектуальная отказоустойчивая система процесса транспорта газа [7-8], все предлагаемые типовые решения задач диагностики и обеспечения отказоустойчивости на разных уровнях иерархии модели технической системы в соответствии с ее рангом неопределенности могут быть реализованы по технологии «цифрового двойника», который может быть описан структурой следующего вида (рис. 6).

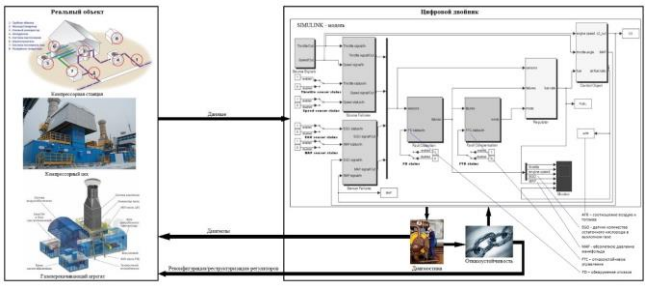


Рис. 6. «Цифровой двойник» интеллектуальной отказоустойчивой системы управления технологическим процессом транспорта газа

Основой цифрового двойника является SIMULINK-модель технической системы, актуализируемая данными, получаемыми от реального объекта. При моделировании на основе данной SIMULINK-модели параллельно с работой реального объекта решаются задачи диагностики и обеспечения отказоустойчивости. Результаты решения этих задач – диагнозы неисправностей и параметры реконфигурации/реструктуризации регуляторов – передаются из виртуальной среды цифрового двойника реальному объекту.

VI. Супервизорное управление

При разработке отказоустойчивых систем управления технологическими системами выбор структуры управления технологическими объектами, образующими нижний уровень иерархии, обычно предопределен.

Эти системы строятся как системы супервизорного управления (рис. 7).

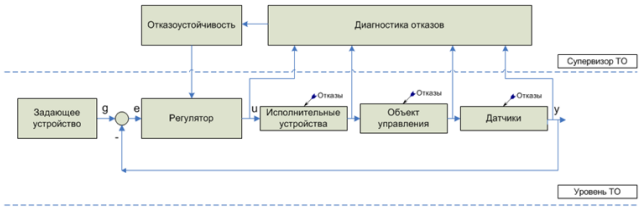


Рис. 7. Супервизорное отказоустойчивое управление ТО

Супервизор «Диагностика отказов» наблюдает за состоянием исполнительных устройств, технологического объекта управления, датчиков технологического процесса и при обнаружении, локализации и идентификации какого-либо отказа (неисправности) активирует супервизор «Отказоустойчивость», который за счет реконфигурации/реструктуризации регулятора пытается обеспечить приемлемое качество управления ТО.

Супервизорное управление известно с пятидесятых годов. Первоначально оно появилось сначала в оборонных отраслях, которые обладали в то время требуемой номенклатурой качественной вычислительной техники и соответствующих интеллектуальных измерительных систем. В настоящее время супервизорное управление является основным и наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами [9]. Достаточно упомянуть о SCADA-системах (Supervisor Control And Data Acquisition – супервизорное управление и работа с данными, в том числе и с большими). Концепция SCADA была разработана для решения задач распределенного управления. Она успешно применялась, в частности, при транспортировке нефти и газа [10].

Необходимо подчеркнуть, что SCADA-системы предоставляют пользовательский интерфейс и обеспечивают сбор и обработку данных, в то время как цифровые двойники предоставляют способ организации системы управления, где, в том числе, может использоваться SCADA как составляющий элемент.

Аналогами SCADA-систем [11], появившимися по тем же причинам и решающими похожие задачи, являются DCS (Distributed Control System – распределённая система управления). Эта концепция часто использовалась в обрабатывающей промышленности. DCS-решения в настоящее время принадлежат частным фирмам. DCS сильно отличаются от SCADA [12], которые, с одной стороны, также относятся к распределённым, с другой стороны, строятся с использованием открытых и COTS- (Commercial Off-The-Shelf – «готовые к использованию») технологий.

COTS-технологии разрабатываются и продвигаются международными (IEC/МЭК, ISO) и национальными (ANSI, DIN, IEEE, ГОСТ) организациями по стандартизации, международными консорциумами (ARINC, PCISIG, VITA, PICMG, GroupIPC и т. д.), крупными (Motorola, HP, DEC, IBM, SUN) компаниями-производителями совместимой серийной техники, поддерживающими стандартизацию. Как результат обеспечивается широкое признание рынком разработанных стандартов. В самом общем смысле можно сказать, что COTS-технология – это та технология, львиная доля инвестиций в которую осуществляется не военным, а офисным и/или общепромышленным «рынком».

В наше время наблюдается тенденция сближения между решениями этих двух типов. С одной стороны, SCADA вбирают в себя многое из DCS-функциональности. В качестве примера можно назвать локальное управление с обратной связью, диагностику отказов, аварийное оповещение, оптимизацию технологических процессов и анализ данных. С другой стороны, DCS-поставщики производят системы, очень похожие на SCADA-аналоги.

Поэтому является логичным в русле современных тенденций строить структуру отказоустойчивых систем управления [13] на уровне управления технологическим процессом [14] на принципах супервизорного управления [15] (рис. 8).

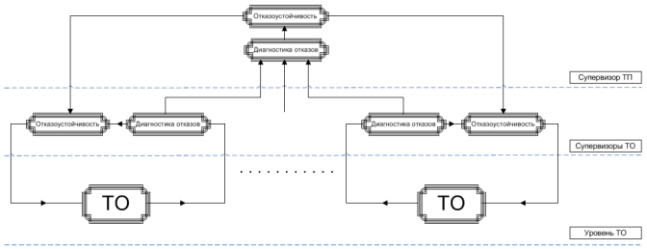


Рис. 8. Супервизоное отказоустойчивое управление

VII. Заключение

Главное преимущество предлагаемого в работе принципа структурной организации на основе принципа супервизорного интеллектуального отказоустойчивого управления состоит в том, что система управления непрерывно контролирует процесс и управляет им оптимально. Использование при этом технологии «цифровых двойников» позволяет:

- быстрое и без значительных вложений тестирование процесса;
- решение проблем с неисправностями до эксплуатации объекта, отслеживание сбоев еще до старта;
- снижение рисков, в том числе финансовых;
- обеспечение безопасности для жизни и здоровья персонала;
- повышение конкурентоспособности и прибыльности;
- возможность долгосрочного прогнозирования и планирования развитие компании или продукта, повышения за счет этого лояльности клиентов.

Список литературы

[1] Кораблев Ю.А. Проектирование гибридных интеллектуальных систем отказоустойчивого управления. СПб: Издательство Печатный Цех, 2019. 156 с.

[2] Кораблев Ю.А., Лосева Д.М., Шестопалов М.Ю. Концепция эволюционного синтеза современных сложных систем управления // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Том 15, № 4. С. 29-34.

[3] M. W. Grieves. Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins, Complex Syst. Theory Pract., pp. 175–200, 2019.

[4] M. W. Grieves. Use a “Digital Twin” to Ensure Products are Built to Design // Dassault Systemes. URL: https://blogs.3ds.com/delmia/use-a-digital-twin-to-ensure-products-are-built-to-design/ (дата обращения 01.02.2023)

[5] M. Mazhar Rathone, Syed Attique Shah, Dhirendra Shukla et al. The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities // IEEE Access PP(99):1-1, Feb. 2021.

[6] Жиляков С.А., Карасев Е.М., Левочкин С.Б. и др. Ранняя диагностика и прогнозирование надежности промышленного оборудования на основе «цифрового двойника» // Neftegaz.RU, №5, Май 2021. URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/682121-rannyaya-diagnostika-i-prognozirovanie-nadezhnosti-promyshlennogo-oborudovaniya-na-osnove-tsifrovogo/

[7] T. R. Wanasinghe, L. Wroblewski, B. K. Petersen et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges // IEEE Access, vol. 8, pp. 104175–104197, 2020.

[8] R.W. Thumeera, L. Wroblewski, K.B. Petersen et al. Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges // IEEE Access, vol. 8, pp. 104175–97, 2020.

[9] Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов / 3-е изд. М.: Академия, 2014. 352 с.

[10] T. Zhuvatov, N. Bataev, A. Kuzyrgaliyev et al. Modeling and research of gas transportation unit operation modes // International Review of Mechanical Engineering, Vol. 13, No 4, April 2019, pp. 224-234.

[11] Кангин В.В., Кангин М.В., Ямолдинов Д.Н. Разработка SCADA-систем: Учебное пособие. Изд-во «Инфра-Инженерия», 2019 г. 564 с.

[12] Герасимов А.В., Титовцев А.С. Проектирование АСУТП с использованием SCADA-систем. Казань: изд-во КНИТУ, 2014. 128 с.

[13] Шишов О.В. Современные средства АСУ ТП. Изд-во «Инфра-Инженерия», 2021. 532 с.

[14] Алексеев М.В., Попов А.П. Проектирование автоматизированных систем: учебное пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2020. 156 с.

[15] Давыдов В.Г. Система супервизорного управления Vijeo Citect: учебное пособие. СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2019. 312 с.

Исследование механизмов проникновения вредоносного программного обеспечения в АСУ ТП промышленных предприятий

С. А. Багусевич, Е. В. Коровкина, В. Л. Литвинов
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
yonhuuh@gmail.com

***Аннотация*. В данной работе были рассмотрены причины, повлиявшие на проникновение вредоносной программы Stuxnet в систему управления автоматизированными процессами Иранского завода, который занимался обогащением урана. На основе этих данных была составлена ментальная карта, показывающая весь путь проникновения вредоносного программного обеспечения.**

Ключевые слова: ментальная карта; вредоносное программное обеспечение; автоматизированные системы управления; тяжелая промышленность; SCADA; Stuxnet

I. Введение

Первый известный компьютерный червь, перехватывающий и модифицирующий информационный поток между программируемыми логическими контроллерами марки Simatic S7 и рабочими станциями SCADA-системы Simatic WinCC фирмы Siemens – это Win32/Stuxnet. Таким образом, червь может быть использован в качестве средства несанкционированного сбора данных (шпионажа) и диверсий в АСУ ТП промышленных предприятий, электростанций, аэропортов и т. п.

Существует предположение, что Stuxnet представляет собой специализированную разработку спецслужб Израиля и США, направленную против ядерного проекта Ирана [1].

II. Этапы проникновения Stuxnet в информационную сеть завода

Уникальность программы заключалась в том, что впервые в истории кибератак вирус физически разрушал инфраструктуру.

В 2010 году была произведена кибератака на Иранский уранообрабатывающий завод, целью стала промышленная система SCADA. Чтобы червь смог получить доступ к автоматизированной системе управления центрифуг, а также смог остаться незамеченным, злоумышленники предприняли различные меры, которые будут рассмотрены ниже.

В первую очередь была проведена внешняя разведка Иранских заводов и предприятий. В 2009 году были атакованы четыре предприятия с помощью вируса Stuxnet, который год спустя, поразит завод по обработке урана. Были получены полезные сведения для проведения атаки в будущем. Полезная, для злоумышленников, информация о заводах и используемой на них технике была собрана с сайтов предприятий, данные находились в свободном доступе.

На данный момент известно об одном подкупленном сотруднике, который передавал внутреннюю информацию о заводе голландской разведке.

Исходя из данных внутренней и внешней разведки, червь Stuxnet был улучшен, благодаря атакам на другие иранские заводы в 2009 году, код был модифицирован с учетом особенностей защиты на этих предприятиях.

Создатели Stuxnet нашли четыре неизвестных раннее уязвимости нулевого дня, все эти уязвимости связаны ОС Windows [2].

Скомпрометированный сотрудник пронёс флэш-накопитель на производство, вставив его в компьютер, имеющий доступ к сетевому принтеру. Разработчики Stuxnet воспользовались уязвимостью в службе диспетчера очереди, которая сделала возможным удаленный запуск кода.

Далее червь распространяется по всей сети, используя уязвимость повышенных привилегий Windows. Stuxnet организует свою собственную peer-to-peer (P2P) сеть для синхронизации и обновления своих копий.

Stuxnet обходит защиту HIPS благодаря реальным сертификатам RealTek и JMicron, следовательно, хаккеры получили доступ к базам данных этих компаний. До сих пор нет достоверной информации о том, как были получены эти сертификаты. Был ли произведен взлом баз данных этих компаний, или они передали сертификаты спецслужбам добровольно [3].

Далее червь распространяется на SimaticWinCC, программное обеспечение под управлением Microsoft Windows, для автоматизации процессов производства компании Siemens.

Главной целью Stuxnet было заражение оборудования Siemens. Далее червь получает доступ к SCADA и программный логический комплекс. Благодаря доступу к SCADA червь оставался незамеченным для сотрудников-контроллеров, а доступ к программируемым логическим контроллерам дал доступ к управлению центрифугами.

В SCADA Stuxnet подменял данные о показателях центрифуги, записывая 21 секунду показателей нормальной работы устройств, далее он немного увеличивал или уменьшал количество оборотов центрифуги, а также повышал давление газа UF-6. Сотрудники-контроллеры не могли заметить какие-то серьезные отклонения, потому что червь начинал действовать в разное время, а также выбирал разные центрифуги для воздействия.

Из-за совсем маленького увеличения количества оборотов и давления газа, а также подмены показаний на маленькие промежутки времени. Stuxnet оставался незаметным пока не вывел из строя 1368 центрифуг.

Червь распространился на большое количество компьютеров под ОС Windows в Иране. У Stuxnet присутствует функционал, позволяющий пересылать на удаленные серверы управления информацию, найденную на компьютере, что позволило собрать огромное количество данных о разных компаниях и жителях Ирана [4].

Авторами был проведен полный анализ механизмов проникновения Stuxnet. Результаты для наглядности представлены в виде ментальной карты. Ментальная карта – это способ визуализации информации, отражающий взаимосвязь элементов, их иерархичность и последовательность. Это современный, быстрый, интересный, емкий, работающий и простой способ систематизации, обобщения, представления, запоминания и аккумуляции большого объема данных.

На рис. 1 представлена ментальная карта событий, которые повлекли за собой разрушение центрифуг завода.

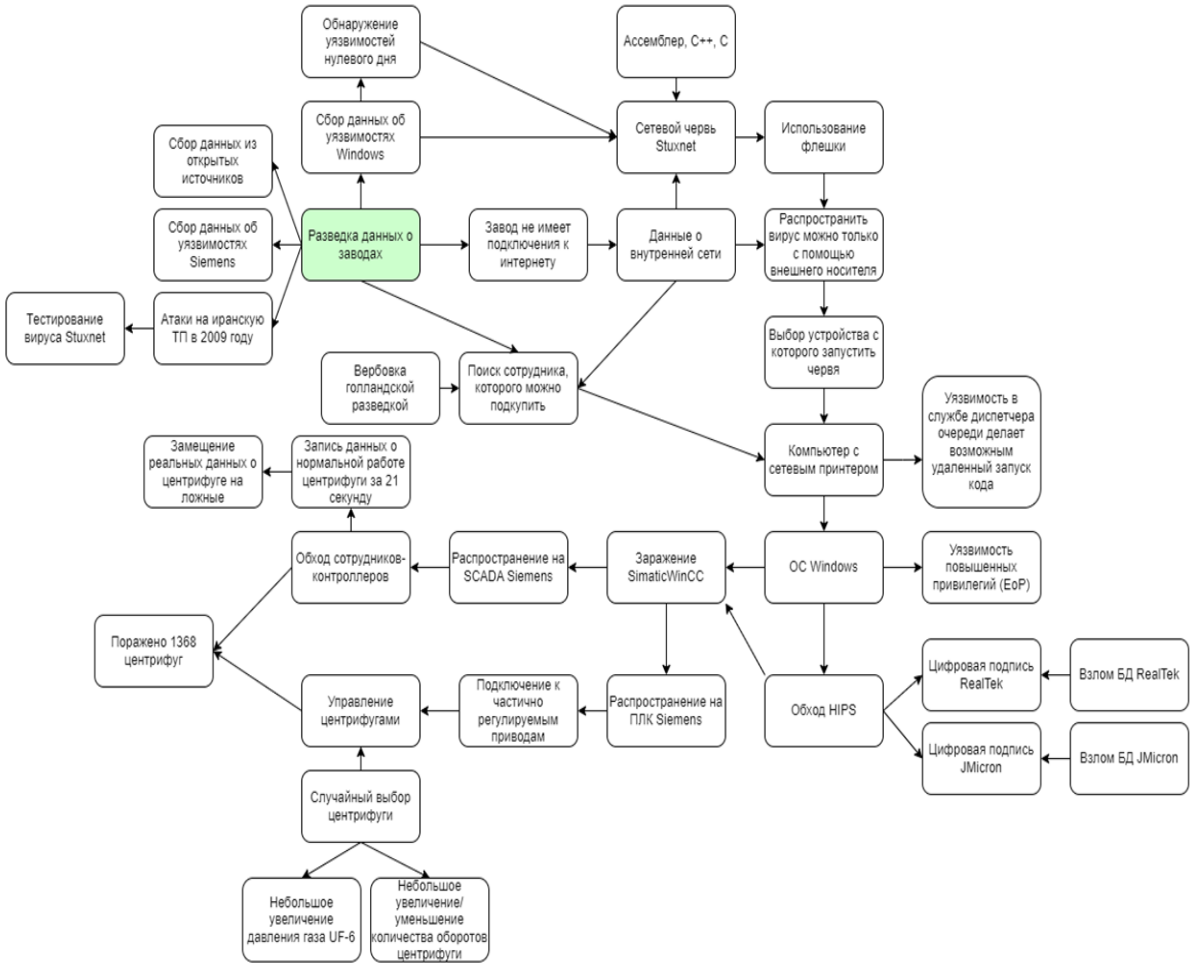


Рис. 1. Ментальная карта атаки

III. Заключение

В ходе данной работы была составлена ментальная карта событий, повлекшие за собой приостановку иранской ядерной компании, были сформулированы шаги, которые прошли злоумышленники для внедрения вредоносной программы в систему завода.

Благодарность

Авторы выражают признательность к.т.н. Поведайко Максиму Дмитриевичу, к.т.н. Бородянскому Юрию Михайловичу за оказанную помощь при проведении настоящего исследования.

Список литературы

[1] A. Matrosov, E. Rodionov, D. Harley, and J. Malcho. Stuxnet under the microscope. ESET. Feb. 2011. vol. 1, pp. 1-85.

[2] D. Helan. Stuxnet: Analysis, myths and realities. Actu Secu, Feb. 2011.

[3] T. M. Chen. Stuxnet, the real start of cyber warfare? Network, IEEE, vol. 24, no. 6, pp. 2-3, 2010.

[4] АО «Лаборатория Касперского» [Электронный ресурс]. 2000. URL: https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/2014_stuxnet-v-detaliakh (Дата обращения 29.08.2023).

Автоматизация измерения диаметров и толщин трубки из кварцевого стекла оптическими методами

А. О. Аль Гурайбави
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
E-mail azhar984@yandex.ru

***Аннотация*. Кварцевые трубы находят широкое применение в различных отраслях, таких как электроника, химическая промышленность, осветительное машиностроение и другие. Традиционно параметры этих труб, особенно их толщина и диаметр, измерялись вручную. Однако в данной статье предлагается метод и алгоритм автоматизированной системы для измерения толщины и внешнего диаметра кварцевых стеклянных труб в процессе производства.**

Одним из заметных преимуществ этого метода является его способность измерять толщину и внешний диаметр трубы в режиме реального времени, учитывая возможные вибрации и колебания, возникающие в процессе формования. Путем использования оптического метода с применением зеленого лазера и быстрого и точного алгоритма обработки изображений система автоматизирует процесс измерения, Это не только экономит время и ресурсы, но также повышает эффективность производства труб.

Ключевые слова: трубки, кварцевое стекло, дефекты, оптический метод, автоматизация, толщина, диаметр

I. Введение

В современном мире по своим свойствам и стандартизации параметров по ГОСТам [1, 2, 3] во многих направлениях промышленности, таких как фармакология, химия, оптика, медицина, находят широкое применение трубки из кварцевого стекла.

К сожалению, оценить качество изделия оператор может лишь после завершения всего технологического процесса, так как стекло разогревается до высоких температур и работать непосредственно с ним человеку не позволяет техника безопасности. Свою роль играют и уникальные оптические свойства стекла, колебания и вибрации в процессе вытягивания – исходя из всех этих причин, становится понятно, что автоматизация контроля качества продукции на основе технического зрения могла бы существенно облегчить задачу управления качеством [4, 5].

Конечно же, можно контролировать размеры трубки классическими, проверенными временем методами, используя микрометр либо штангенциркуль. Но способ этот, при всей его простоте, имеет ряд недостатков – им нельзя измерять трубки малого диаметра, а также нельзя вести контроль непосредственно во время производства. Кроме того, трубки малого диаметра также трудно поддавались такому контролю.

Более современными являются такие технологии управления качеством, как магнитный метод на эффекте Холла и ультразвуковой метод. Первый измеряет параметры магнитного поля между введенным в трубку стальным шариком и зондом, а второй определяет толщину трубки по времени прохождения акустического импульса высокой частоты [6, 7].

Находят применение и достаточно точные методы на основе интерферометров [8] даже несмотря на то, что они плохо применимы для трубок и недостаточно приспособлены для работы в условиях производства. Настоящая статья же представляет методику измерения толщины трубки, использующую законы геометрической оптики.

A. Предлагаемый метод контроля

В методе, который предлагает данная статья, на экран проецируются лучи лазера, которые отражаются от внутренних и наружных поверхностей передней и задней стенок трубки, а уже с экрана же изображение через камеру передается в компьютер (рис. 1). Важно помнить, что расстояние от трубки до экрана должно быть не менее полуметра, так как температура в печи во время вытяжки может достигать 1000–1300 °C [9].

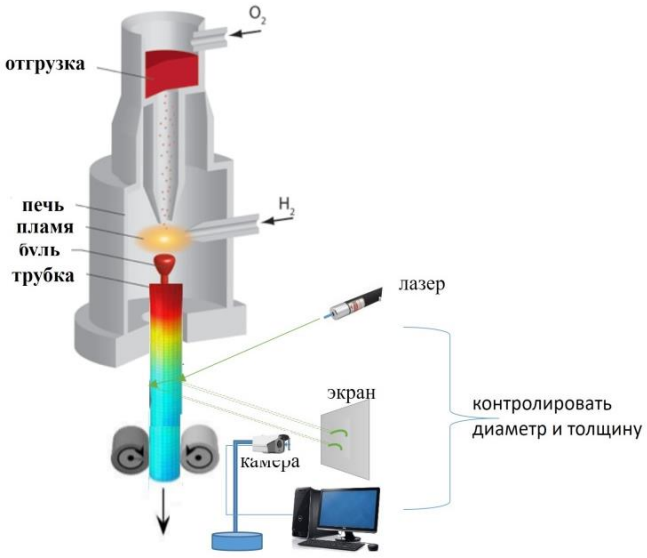


Рис. 1. Метод контроля

Оптическая схема предлагаемой системы строится из таких элементов как лазер с возможностью настройки, выступающий в роли источника света, принимающего лучи экрана и камеры. Система измеряет толщину трубки β (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**рис. 1), которой пропорционально расстояние Δ между лучами, в виде которых отражается направленный под углом *i* к образующей трубки луч от источника

света. Данный метод измерения толщины стенки трубки в увеличении представлен на рис. 2 [10].

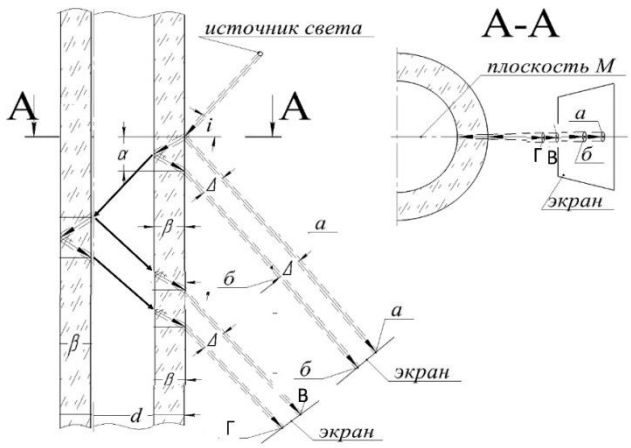


Рис. 2. Иллюстрация работы метода

Зависимость величины Δ от угла падения i, как следует из рисунка, можно найти выражением: $\Delta = \alpha \cos i$, при этом $\alpha = 2\beta \operatorname{tg} j$. j – угол преломления, для определения которого можно применить уравнение $n_c = n_в \sin i / \sin j$, где n_c – коэффициент преломления. Уже отсюда можно вывести угол преломления $j = \operatorname{asin}(n_в \sin i / n_c)$. Таким образом, зависимость между величиной Δ и толщиной стенки трубы β приводится к виду:

$$\Delta = 2\beta \operatorname{tg}(\arcsin(n_в \sin i / n_c)) \cos i \qquad (1)$$

$n_в$ показатель преломления воздуха (1,000278 на длине волны лазера λL 532 нм) [11].

На рис. 3 представлен результат расчета величины Δ при различных углах падения i для трубки с толщиной стенки $\beta = 1$мм, учитывая, что коэффициент преломления для кварца $n_c \approx 1.46$.

Как видно из графика (рис. 3) полученная зависимость имеет максимум измеряемой величины Δ при угле падения луча $i \approx 50°$, при этом скорость изменения измеряемой величины при приближении к максимуму стремится к нулю. Хотя на графике представлен частный случай зависимости, а именно при фиксированной толщине стенки $\beta = 1$ мм, в общем случае профиль зависимости будет аналогичным при любой толщине стенки. Таким образом, представленная зависимость будет полезна при выборе угла падения луча i, фиксируемого при юстировке установки. Зафиксированный угол падения луча будет использоваться для решения задачи определения неизвестной величины толщины стенки трубки β по измеряемой величине Δ [10].

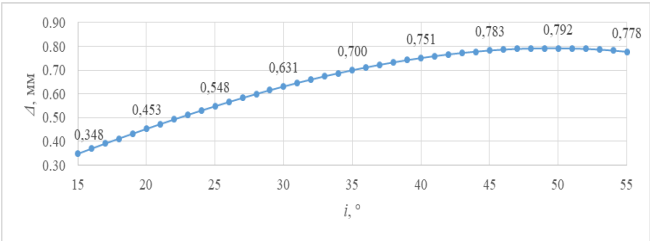


Рис. 3. Зависимость измеряемой величины Δ от угла

Угол падения светового луча i необходимо устанавливать с учетом безопасного расстояния от разогретой трубки до аппаратуры и габаритных ограничений, учитывая также, что размеры установки увеличиваются с увеличением угла i. Также необходимо учитывать влияние величины угла на точность измерений и для ее увеличения минимизировать скорость измерения. Если необходима наиболее четкая сегментация лучей, отраженных на внутренней и внешней стенках трубки, нужно максимизировать величину Δ.

На основании уравнения (1) выразим уравнение расчета толщины стенки β [10]:

$$\beta = \frac{\Delta \sqrt{n_c^2 - (n_в \sin i)^2}}{sin2i} \qquad (2)$$

Блок-схема предлагаемого алгоритма измерения толщины и диаметра труб в реальном времени оптическим методом приведена на рис. 4. Алгоритм реализован на Python 3.7 в рабочей среде PyCharm 2021.3.1 (Community Edition) с использованием библиотеки OpenCV, которая используется для обработки цифровых изображений совместно с другими библиотеками для анализа 2D-изображений. Алгоритм обнаруживает и обрабатывает изображения света, сфокусированного на экране и отраженного от внешней и внутренней поверхностей стенки трубки, используя в качестве источников света лазеры, работающие в зеленом диапазонах спектра. Изображения, снятые в формате RGB (рис. 3), преобразуются в пространство HSV [12]. Далее нам нужно выбрать область определенного цвета в пространстве HSV и интервал изменения значения канала – большую часть времени нас интересует канал H (оттенок), чтобы выбрать интересующий, используйте cv2 Функция .inRange() (рис. 4) [12]. В изображении маски белый и черный представляют области, соответствующие значениям интенсивности пикселей внутри и вне диапазона соответственно.

Фильтры обычно имеют квадратные конструктивные элементы (окна фильтра). Уровни яркости пикселей, принадлежащих окну фильтра, располагаются в порядке возрастания или убывания (серия изменения), и назначается значение интенсивности среднего члена серии изменения. Используем фильтр с размером окна 3x3 пикселя [13].

Но следует отметить, что этот метод эффективен для чистых, чистых трубок, а некоторые трубки могут быть нечистыми, поэтому разделение между двумя лучами нечеткое, поэтому расстояние между пикселями можно рассчитать с помощью функции:

```
dist = cv2.distanceTransform(thresh, cv2.DIST_L2, 5)
```

Этот шаг выполняется после морфологического процесса (процесса закрытия) для заполнения пробелов.

Оператор преобразования расстояния принимает бинарные изображения в качестве входных данных. В этой операции интенсивность уровня серого точек внутри областей переднего плана изменяется, чтобы удалить их соответствующие расстояния от ближайшего нулевого значения (границы). Выбрать тип операции

преобразования расстояния, который вам нужен, передав соответствующее предопределенное значение в параметр с именем DistanceType метода DistanceTransform(). Типы расстояний для преобразования расстояний и M-оценок DIST_L2 [14], расстояние

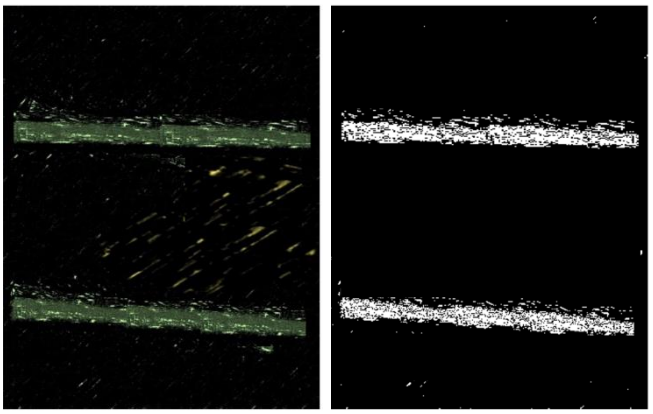
$$\text{DIST_L2} = \sqrt{[(x_{22} - x_{11})^2 + (y_{22} - y_{11})^2]}$$

где: $[x_{11}, y_{11}]$: координаты одной точки
$[x_{22}, y_{22}]$: координаты другой точки
DIST_L2: расстояние между $[x_{11}, y_{11}]$и $[x_{22}, y_{22}]$.

Преобразование расстояния – это операция, которая преобразует бинарное изображение, состоящее из характерных и нехарактерных элементов, к изображению, где каждый элемент имеет значение, которое приблизительно расстояние до ближайшего элемента функции. Так как изображение бинарное (черно-белое). Это поможет нам легче различать объекты переднего плана, когда мы будем применять. преобразование расстояния [14, 15].

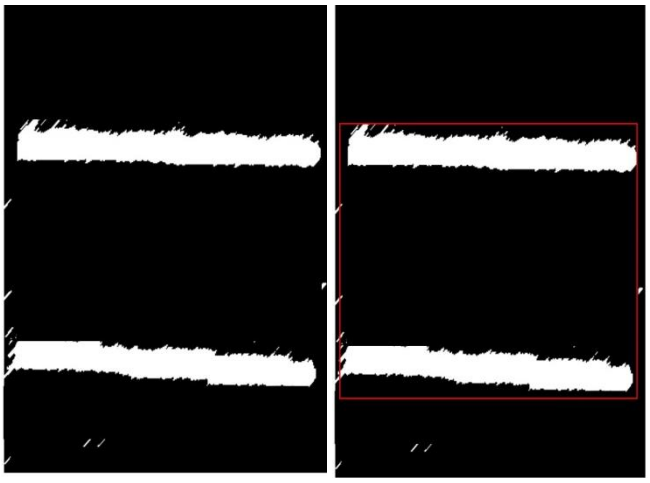
Предложенный метод апробирован для автоматического измерения толщины и наружного диаметра трубок из кварцевого стекла. Обработку проводили на персональном компьютере, оснащенном процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40 ГГц. Алгоритм доказал свою эффективность: все конечные дефекты, допущенные при тестировании метода, были выявлены. В этом случае среднее время обработки изображения 30 миллисекунд.

Рис. 4. Блок-схема предлагаемого алгоритма



а) б)

Рис. 5. Изображение лучей, отраженных от внешней и внутренней поверхностей стенок трубки: а) исходное, б) бинаризированное по порогу



а) б)

Рис. 6. а) Изображение после морфологического процесса – закрытие; б) изображение после процесса выбора

Нарисовать приблизительный прямоугольник вокруг границ бинарного изображения, чтобы определить внешний диаметр, который представляет собой наибольшее расстояние между внешними границами двух лучей. Функция boundingRect() в OpenCV в основном используется для выделения интересующей области после получения контуров из изображения.

x,y,w,h =cv2.boundingRect() возвращает 4 числовых значения, когда контур передается в качестве аргумента. Эти 4 значения соответствуют x, y, w, h соответственно. Эти значения более подробно описываются как (координата X, координата Y, ширина, высота). Эти значения можно использовать для рисования прямоугольника или обрезки части изображения с использованием координат пикселей.

II. Заключение

Таким образом, предложен и изучен оптический метод с использованием зеленого лазера и автоматизации измерения толщины и внешнего диаметра кварцевых трубок с помощью высокоскоростного и точного алгоритма обработки изображений, который позволяет решать задачи в режиме реального времени во время их изготовления. Метод не требует предоставления эталонных изображений для определения толщины. Важным преимуществом этого

метода является возможность измерения толщины трубы и наружного диаметра вместе с возможными ее вибрациями и вибрациями при волочении.

Список литературы

[1] ГОСТ 8680-73 Трубы из прозрачного кварцевого стекла. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1973, 13 с.

[2] ГОСТ 15177-70 Трубы из прозрачного кварцевого стекла для источников света и электровакуумных приборов. М.: Издательство стандартов, 1972, 11 с.

[3] ГОСТ 16548-80. Стекло кварцевое и изделия из него / Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2006, 17 с.

[4] Foglia P., Prete C., Zanda M.. Inspection system for pharmaceutical glass tubes // WSEAS transactions on systems archive, 2015. Volume 14. P.123-136.

[5] De Vitis G.A., Foglia V.P., Prete C.A. A Technique to Reduce the Processing Time of Defect Detection in Glass Tubes // Intelligent Computing - Proceedings of the Computing Conference, 2019: Intelligent Computing. P.165-178. doi:10.1007/978-3-030-22871-2_13.

[6] Performing wall thickness measurement of glass products. Режим доступа: https://www.prestogroup.com/blog/performing-wall-thickness-measurement-of-glass-products/ (дата обращения 01.02.2023г.)

[7] Inline wall thickness measurement of glass. Режим доступа: https://www.precitec.com/optical-3d-metrology/applications/glass/ (дата обращения 01.02.2023 г.).

[8] Романова Г.Э. Конспект лекций по курсу «Компьютерные методы контроля оптики» / Г.Э. Романова, М.А. Парпин, Д.А. Серегин. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 185 с.

[9] Харазов В.Г. Управление высокотемпературными процессами с помощью ЭВМ. Л: Стройиздат,1983. 320 с.

[10] Аль Гурайбави А.О., Воробьев Н.В., Русинов Л.А. Измерение и контроль толщины кварцевых трубок оптическим методом // Контроль. Диагностика. 2023 Т. 26, № 9. С. 50–57 DOI: 10.14489/td.2023.09.pp.050-057

[11] Yong-Jae Kim, Peter M. Celliers, Jon H. Eggert, Amy Lazicki & Marius Millot, "Interferometric measurements of refractive index and dispersion at high pressure" // Scientific Reports, volume 11, article number: 5610 (2021).

[12] OpenCV and Python Color Detection, Режим доступа: https://pyimagesearch.com/2014/08/04/opencv-python-color-detection/ (дата обращения 1.02.2023).

[13] Kadhim M.H., Rusinov L.A. Automation of the control of ceramic tile surface defects // IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2021, 68–71p.

[14] Miscellaneous Image Transformations , https://docs.opencv.org/4.x/d7/d1b/group__imgproc__misc.html

[15] Peddiredd R.P., Semwal S.K., Implementation of Distance Transformation in the Processing Language // Future Technologies Conference (FTC), Vancouver, Canada, 2017.

Анализ технологий в системах хранения данных при разработке собственного решения

А. В. Ерошкин[1], М. А. Потапова[2], А. Е. Лончина[1]
[1]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*
[2]*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*
Санкт-Петербург, Россия
eroshkin.a.spb@gmail.com

***Аннотация*. В данной работе приводится обзор существующих технологий для разработки систем хранения данных с целью разработки собственного решения. С целью выявления преимуществ и недостатков технологий были рассмотрены несколько определяющих компонентов таких систем. Сначала обозреваются концептуальные подходы к построению СХД. Затем определяется классификация по необходимому формату хранимых данных. Также важно учесть протоколы передачи данных, так как это в том числе определяет скорость работы и надежность СХД. Обзор завершается рассмотрением существующих накопителей для непосредственного хранения данных. В заключении приводится подведение итогов обзора решений, приводятся конкретные примеры, когда стоит отдавать предпочтение тем или иным решением. Выбор технологий зависит от многих факторов таких как, например, закладываемый бюджет на такую систему, тип данных, который необходимо хранить, приоритет скорости и надежности передачи данных, их объем и другое.**

Ключевые слова: система хранения данных, облачное хранилище, эфемерные хранилища, DAS, NAS, SAN, Unified Storage, SSD, HDD, протоколы передачи данных

I. Введение

Сфера применения систем хранения данных (СХД) охватывает множество областей и постоянно расширяется. В настоящее время системы хранения данных используются для хранения информации с целью составления отчетности и формирования прогнозов, хранения видеофрагментов, документов, фотографий и других всевозможных информационных объектов. Также наблюдается постоянный рост объема хранимых данных, который обусловлен множеством различных факторов, таких как, например, ужесточение регулирования оборота пользовательских данных, необходимость хранения все большего объема информации, относящейся к ведению различных видов бизнеса. Рост объема хранения данных также связан с ростом числа интернет-пользователей, которые публикуют и сохраняют в облачных хранилищах различные документы, фотографии и видеозаписи. Дополнительным фактором роста объема цифровой информации, необходимой для хранения, является повсеместное внедрение систем электронного документооборота.

Выбор систем хранения данных представляет собой сложную комплексную задачу, так как при выборе необходимо учитывать большое количество факторов, таких как функциональность, скорость доступа к данным, стоимость обслуживания, возможность расширения и надежность хранения данных.

Дополнительным фактором, усложняющим выбор необходимой системы, является уход с российского рынка значительного количества зарубежных компаний, предоставляющих СХД, поэтому перед российскими ИТ-компаниями встает вопрос о реализации собственного продукта, который будет использовать современные технологии и предлагать бизнесу решение, способное покрыть все его потребности и требования.

Прежде чем приступить к разработке СХД, необходимо провести обзор существующих на рынке решений и технологий, а также определиться с перечнем инструментов, которые будут использоваться в собственном решении.

II. Обзор технологий СХД

Обзор технологий СХД следует начать с рассмотрения концептуальных основ подходов к построению СХД. К таким подходам относятся: DAS, NAS, SAN, Unified Storage, облака и эфемерные хранилища. Ниже приведены преимущества и недостатки каждого из подходов [1]–[2].

DAS (Directed Attach Storage) – это устройства хранения данных, которые напрямую подключаются к компьютеру через различные интерфейсы. Жесткие диски, твердотельные накопители или даже дисковые массивы могут служить в качестве DAS. К преимуществам данной технологии можно отнести:

- легкость развёртывания и администрирования;
- высокая скорость передачи данных за счет прямого доступа к серверу;
- низкая стоимость оборудования.

Вместе с тем этот подход обладает достаточно весомыми недостатками, такими как:

- неоптимальное расходование ресурсов, что требует отдельно выделенного сервера;
- ограничение в подключениях, так как технология предусматривает возможность подключения не более двух серверов;
- низкая надежность и слабая распределенность хранимой информации, то есть в случае выхода управляющего сервера из строя вся СХД становится недоступной.

Технология NAS (Network Attached Storage) подразумевает под собой систему хранения данных, подключаемую к сети. К примерам использования NAS можно отнести систему NFS (сетевая файловая система) для Linux или SMB (блок сообщений сервера), которая используется для Windows. Данная технология обладает

рядом преимуществ, таких как, например, простое совместное использование информации за счет доступа к файлам в сети, широкая доступность и низкая стоимость, простота подключения и управления, как и у DAS, возможность быстро увеличить необходимый объем данных, а также универсальность доступа к файлам, поскольку компьютер с любой операционной системой может получить необходимые файлы.

Однако у NAS есть возможность хранить данные только в виде файлов. Также, в связи с необходимостью использования сетевых протоколов возникают проблемы со скоростью доступа к данным по сравнению с локальной системой.

Дальнейшим развитием технологий СХД стало хранилище на основе технологии SAN (Storage Area Network). Данный подход подразумевает вынесение устройств хранения и коммутации данных в отдельную сеть. Это решение стало ответом не только на недостатки систем DAS и NAS, но также и на проблемы перегрузки каналов связи и задержки в локальных IP-сетях, что ограничивает скорость работы СХД. Кроме этого, такие системы обладают высокой надежностью обмена и хранения данных, гибкостью, масштабируемостью, а также удобным механизмом резервирования данных без загрузки локальной сети и серверов

Несмотря на перечисленные преимущества, системы, основанные на технологии SAN, имеют следующие недостатки:

- сложность проектирования;
- высокая стоимость;
- сложность настройки протоколов;
- жесткие требования по совместимости оборудования в сети.

Перед тем как перейти к дальнейшему изучению других технологий необходимо определиться с форматом хранения данных. Существует несколько разновидностей: файловые, блочные и объектные [3].

Файловые СХД подразумевают под собой сервер с файловой системой со своими директориями и соответствующей иерархией. Доступ к данным в таком хранилище осуществляется по id файла, который содержит имя сервера, путь к директории (папке) и имя искомого файла. Такие СХД легко администрируемы и удобны в использовании, так как интерфейс управления файловой СХД выглядит аналогично файловому менеджеру («проводнику») на любом компьютере. Файловые СХД легко масштабируемы до определенных размеров, доступ к файлам может получить большое число пользователей одновременно, однако если их очень много, то скорость работы будет замедлена. Кроме того, при масштабируемости система навигации становится все более сложной, а время доступа к файлам увеличивается. Таким образом, файлы в таких СХД большого объёма будут открываться сравнительно медленно.

В блочных СХД данные разделены на блоки одинакового объема. При этом в блоках хранятся не готовые файлы, а лишь части данных. Блочные решения хорошо подходят для размещения баз данных, где часто происходит изменение определенных блоков в файлах. Такие системы обладают гибкостью за счет быстрого переноса и увеличения блоков данных без какого-либо влияния на быстродействие. Также блочные СХД высокопроизводительны, поэтому подходят для приложений, требующих высоких скоростей ввода-вывода, таких как, например, серверы баз данных.

Однако блочные СХД сложны в настройке и обслуживании и имеют достаточно высокую стоимость. Также, блочная СХД строго привязана к определённому серверу в каждый момент времени и не может в этот же момент предоставлять доступ к данным другому серверу.

Объектная СХД – это хранилище для неструктурированных данных. Данные в нем делятся на объекты с уникальными идентификаторами и подробными метаданными: всё это нужно для удобного поиска объектов. В связи с этим основным недостатком данной СХД является скорость доступа к файлам в связи с транзакционными нагрузками и усложненным поиском данных. Стоит учитывать, что в случае неструктурированных данных будет сложно настроить другой тип хранилища, отличный от объектного.

NAS относятся к файловым СХД, SAN и DAS – блочным. Unified Storage (универсальные хранилища) позволило объединить в себе 2 этих типа хранилища.

Такие хранилища позволяют использовать как блочный (SAN), так и файловый тип доступа (NAS) к общим ресурсам, что позволяет использовать преимущества обеих технологий. Однако, это приводит к увеличению сложности по сравнению с NAS, а также с необходимостью увеличения числа оборудования, из-за чего растет сложность таких систем.

Облачные и эфемерные хранилища подразумевают развертывание только вычислительных служб, то есть пользователи не имеют доступа к какой-либо постоянной системе хранения по умолчанию. Таким образом, нет необходимости в приобретении большого числа собственного оборудования, что гораздо снижает расходы. Однако, такие хранилища обладают весомыми недостатками такими, как:

- зависимость от Интернет-соединения. Если соединение нарушается, данные в облаке становятся недоступными;
- зависимость от провайдера;
- риски безопасности (пересылка данных за пределы корпоративной сети всегда представляет собой риск с точки зрения информационной безопасности).

Для передачи данных СХД используют различные протоколы передачи данных, такие как SCSI, iSCSI, SAS, Fibre Channel (FC) или Fibre Channel over Ethernet (FcoE) [3].

Протокол SCSI – это набор стандартов, используемых для подключения компьютеров к различным устройствам хранения. Он обладает независимостью от используемого сервера. Также он обладает высокой скорость передачи данных за счет прямого подключения устройства к компьютеру. Это влечет за собой ограничение в количестве подключенных устройств и дальности соединения между ними. В связи с этим было разработано следующее решение, которое решало эту проблему. iSCSI – это высокоскоростное недорогое решение для систем хранения, подключаемых удалённо, через Интернет. Стоит отметить, что при использовании сетей TCP / IP для передачи команд SCSI по протоколу iSCSI

возникают накладные расходы, которые влияют на общую производительность, по сравнению с СХД, использующих SAS и FC.

Протокол SAS и одноименный интерфейс разработаны для замены параллельного SCSI и позволяет достичь более высокой пропускной способности, чем SCSI. СХД на базе SAS не может подключаться к такому количеству хостов (серверов), как СХД, которые используют протоколы FC или iSCSI, но при использовании протокола SAS нет необходимости закупки дополнительного оборудования для организации общего хранилища для нескольких серверов. Однако, в связи с этим, как и SCSI, данный протокол имеет ограничение в расстоянии между устройствами, которое ограничено длиной кабеля.

Технология FC широко применяется для систем хранения данных. Этот протокол обладает высокой скоростью передачи данных, и его можно использовать для построения полнофункциональной высокоскоростной сети. Также возможен одновременный множественный доступ к данным и соединения на больших расстояниях. Однако, такое решение имеет достаточно высокая стоимость, поэтому такая инфраструктура лучше всего подходит для крупных банков и корпораций, где скорость передачи данных и безопасность являются очень высокими приоритетами. С целью снижения затрат на использование FC был разработан протокол FcoE. FCoE не пользуется TCP/IP, который использует iSCSI. FCoE переносит структуры Fibre Channel через Ethernet, инкапсулируя кадры Fibre Channel. Такие решения дешевле, поскольку одна и та же инфраструктура используется как для связи между серверами, так и между сервером и СХД. Однако, протокол FCoE медленнее, чем FC за счет использования передачи данных через Ethernet, что накладывает ограничения на скорость работы. Также этот протокол влечет за собой более строгие требования к инфраструктуре.

Кроме этого, при построении СХД важно рассмотреть различные типы используемых накопителей для хранения данных. Существует 5 типов таких накопителей: Шпиндельные (HDD), Твердотельные (SSD), SSD NVMe и Гибридные (SSHD) [4].

HDD (hard disk drive) – это устройство хранения информации, основанное на принципе магнитной записи. Такие диски являются основным накопителем данных в большинстве компьютеров, поскольку имеют небольшую стоимость и обладают большим количеством циклов перезаписи и более высокой надежности, чем SSD. Однако, HDD накопители имеют гораздо меньшую скорость работы, чем другие накопители, и обладают высоким уровнем шума.

SSD (solid-state drive) диски работают принципиально по-другому, являются альтернативой HDD устройствам. Это запоминающее устройство, которое работе на основе микросхем памяти. Они имеют меньший вес, размер, являются бесшумными и обладают гораздо большей скоростью производимых операций, что увеличивает скорость чтения/записи данных в несколько десятков раз по сравнению с HDD. Однако, это приводит к увеличению стоимости таких накопителей. По соотношению цены к объему SSD уступают HDD в 3,5–4 раза. Также стоит учитывать, что скорость записи и чтения SSD накопители значительно зависит от количества оставшегося свободного пространства. Кроме этого, они обладают меньшим числом циклов перезаписи по сравнению с HDD.

В 2016 году были представлены SSD, которые используют интерфейс NVMe (NVM Express). Основное преимущество таких дисков заключается в оптимизированном алгоритме работы с очередями и обработкой прерываний, тем самым обеспечивая более высокий уровень производительности, а значит и скорости работы накопителя. Из-за необходимости разрабатывать грамотную систему охлаждения, использовать скоростные модули памяти и организацию высокотехнологичного производства такие диски обладают еще более высокой стоимостью, чем HDD и SSD без NVMe. Если подключать такие диски к системам хранения данных в качестве накопителя, то это приводит к потере их основного преимущества, поскольку, таким образом, увеличивается время и количество задержек за счет использования команд SCSI. Недостатки использования такого протокола описаны выше. Для устранения этого недостатка ведется разработка над NVMe over Fabrics, который основывается на добавлении FC и протоколы передачи данных блочного уровня, которые используют команды NVMe вместо SCSI.

Существуют All-Flash СХД, использующие в качестве носителя флеш-память, построенные целиком на SSD носителях. Предпочтительнее использовать такие системы для аналитики больших объемов данных, нейросетях и других приложениях, которые требуют очень низких задержек при обмене данными.

SSHD диски представляют собой устройство хранения данных, которое сочетает в себе технологии хранения данных на жестком и твердотельном накопителе. За счет того, что такие диски содержатся в корпусе HDD, они по-прежнему занимают большое место в стойке для дисков в СХД и требуют хорошую систему охлаждения. Они также обладают аналогичной скоростью передачи данных по сравнению с HDD, однако гибридные диски сильно выигрывают по времени доступа к файлам. Однако использование таких дисков лишь немного увеличивает скорость работы системы, но если стоит вопрос о разработке системы хранения данных, где не встает вопрос об экономии средств, то лучше отдавать предпочтение жестким и твердотельным накопителям по отдельности.

III. Заключение

Выбор технологий при разработке собственного решения системы хранения данных всегда зависит от того, для чего будет использоваться такая система. Также важным фактором является закладываемый бюджет, который компания или конкретное лицо готово заложить на покупку и сопровождение такой системы.

Если в течение деятельности скорость передачи данных, а также их сохранность не являются самым высоким приоритетам, то нет необходимости приобретать самые дорогие решения, такие как All-Flash СХД, которые используют протокол Fibre Channel, так как стоимость приобретения лицензии на него гораздо выше, чем использование протоколов SCSI или iSCSI. Также если есть необходимости в обычном архивировании данных, нет необходимости отдавать предпочтение носителям, которые обеспечивают высокую скорость передачи данных. В таких случаях

лучше приобрести СХД, основанную на HDD дисках, что практичнее и дешевле в таких ситуациях.

В случае, когда такие СХД необходимы для постоянного доступа и быстрого обмена информацией, то стоит отдать предпочтение All-Flash системам, которые используют безопасные и быстрые протоколы передачи данных.

Что касается типа сетевого доступа, в этом случае стоит также обратить внимание на то, что именно необходимо хранить в таких системах, и насколько важна скорость доступа к данным, насколько важна независимость от Интернет-соединения и постоянный доступ к физическому хранилищу.

Например, если СХД необходима для электронного документооборота, то лучше выбрать файловое хранилище, так как нет большой необходимости в быстром доступе к документам, а также важна иерархия файлов в системе. В случае необходимости развертывания базы данных, лучше использовать блочные системы для высокоскоростного доступа к файлам. Если есть необходимость хранения данных не только в файловом формате, то можно отдать предпочтение универсальным хранилищам.

Список литературы

[1] Дюмин А.А. Основные подходы к организации схд (das, nas, san, cas). Особенности реализации, достоинства и недостатки каждого // Лекции по предмету «Архитектуры вычислительных систем» МИФИ. URL: https://dozen.mephi.ru/files/avslec1-2011.pdf (дата обращения: 01.09.2023).

[2] Основные системы хранения данных и их особенности. — Текст: электронный // vistlan.ru: [сайт]. — URL: https://www.vistlan.ru/info/blog/tekhnologii/osnovnye-sistemy-khraneniya-dannykh-i-ikh-osobennosti/ (дата обращения: 01.09.2023).

[3] Основные протоколы хранения: использование и перспективы. — Текст: электронный // habr.com: [сайт]. — URL: https://habr.com/ru/companies/raidix/articles/329472/ (дата обращения: 01.09.2023).

[4] Гадасин Д.В., Рахмани Д., Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Шалагинов А.В., Шведов А.В. / Под ред. д.т.н., проф. В.А. Докучаева. Системы хранения данных: учебное пособие / МТУСИ. М., 2022. 150 с.

Локализация местоположения нарушения целостности магистрального нефтепровода

Ю. С. Михайлова
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
julia.mikhailova2002@gmail.com

***Аннотация*. Система транспортировки нефти является ключевым звеном в цепочке от места добычи до нефтеперерабатывающего завода (НПЗ). От безотказности работы этой системы во многом зависит не только рентабельность нефтедобывающих компаний, но и экологическая безопасность. Обработка ежегодной статистики причин развития аварий показывает преобладание разгерметизации как источника развития большинства аварийных ситуаций. Поэтому вопрос своевременного обнаружения разгерметизации и локализации места утечки с максимальной точностью остается актуальным до сегодняшнего дня.**

Действующие сегодня нормативные документы по диагностике магистральных нефтепроводов дают описание по применению разных методов, каждый из которых имеет свою специфику. В работе представлен алгоритм на базе комбинированной диагностической модели состояния нефтепровода для решения задачи локализации местоположения точки разгерметизации.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод; диагностическая модель; локализация точки разгерметизации

I. Магистральный нефтепровод, как объект диагностики

Магистральный нефтепровод – это комплекс сложных инженерных сооружений, включающий кроме участков трубопроводов длиной более 50 км и диаметром 220–1220 мм, нефтеперекачивающие станции, резервуарные парки, пункты приема, склады для хранения нефти и т. д. [1] Наиболее сложными в плане эксплуатации и ремонта являются участки транспортных магистралей, в силу своей потенциальной опасности, территориальной распределённости и удаленности от мест расположения станций с обслуживающим персоналом.

В качестве объекта выбран линейный участок МН длинной 50 км 3 класса (Dy=500 мм) с пересечением водных преград (участки категории I) и преимущественно подземной прокладкой (категория IV). Технологическая схема линейного участка магистрального трубопровода (МТ) приведена на рис. 1.

Глубина заложения нефтепровода при траншейной прокладке составляет 0,8 – 1,0 м до верхней образующей, что обеспечивает защиту от механических повреждений и воздействия окружающей среды, но при этом сильно повышает стоимость обслуживания МТ и усложняет процедуру мониторинга технического состояние.

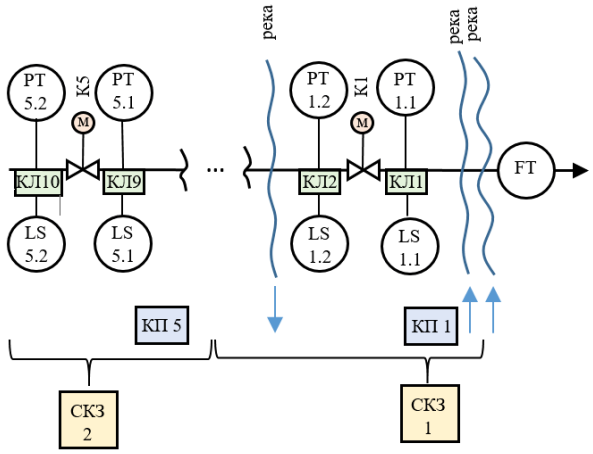


Рис. 1. Пример линейного участка МН

По длине линейного участка расположены крановые узлы К1–К5. Расстояния между ними: 10, 4, 8, 23 и 5 км соответственно. Для проведения коммерческого учета и мониторинга состояния МТ в колодцах КИП К1–К10 установлены датчики давления (PT), датчики контроля герметичности (GT) и реле уровня (LS). Датчики контроля герметичности позволяют оценить состояние узлов пуска и приема, линейной части МТ и примыкающей к ним запорной арматуры. Коммерческая точка контроля расхода расположена на входной площадке НПЗ (FT). Камеры приема и пуска предусмотрены для запуска диагностирующего устройства, выполняющего функции очистки внутренней полости трубопровода от загрязнений и для проведения внутритрубной диагностики. Диспетчерский пункт включает ряд вспомогательных систем, работа которых направлена на обеспечение безопасной эксплуатации МТ: станции катодной защиты, установки протекторной защиты, установки электродренажной защиты и другие. Устройства катодной защиты, включающие в себя источник питания, станцию катодной защиты (СКЗ), дренажный кабель, анодные заземлители и контрольно-измерительный пункт (КП), рис. 1. Участки нефтепровода, подверженные опасному влиянию блуждающих токов, оборудуются дренажным защитным устройством.

Анализ описания АСУ показывает, что в случаях появления отказов, в том числе разгерметизации, решение задач локализации места отказа и принятие мер по его ликвидации преимущественно является областью ответственности обслуживающего персонала.

II. Классификация методов обнаружения нарушения целостности нефтепровода

Как показывает обобщающая статистка, в год на МТ возникает около 50 тыс. отказов, ряд которых носит техногенный характер [2]. И если из общего числа отказов выделить только нарушения целостности МТ, то в качестве основных причин можно назвать: коррозийный износ, внешнее механическое воздействие, несанкционированное проведение работ, отказ технических устройств. Использование проектных способов снижения частоты разгерметизации за счет замены ослабленных коррозией участков трубопровода на новые линии с современным уровнем изоляции и встроенным контрольным кабелем тормозится высокой стоимостью работ. В состав АСУ обязательно входит система ПАЗ но, как показывают результаты опроса инженеров ремонтных бригад, из-за значительных давлений в трубопроводе при аварии происходят повреждения кабельных эстакад, что выводит из строя системы управления. Существует сложность обнаружения слабых утечек на ранней стадии, что связано с затягиванием выхода показателей за предаварийные пороги.

Для решения задачи своевременного обнаружения утечки и локализации точки ее возникновения предложено множество разноплановых методов: визуальный контроль, внутритрубная диагностика, метод «по волне давления», контроль по профилю и балансу давления и расхода, акустоэмисионный метод, волоконно-оптический контроль [3]. Приведенный в качестве примера линейный участок МТ имеет контроль расхода только на входе нефтеперекачивающей стации, пересечение по трассе водных преград из-за преимущественно подземной прокладки на участке не имеет автоматического контроля разгерметизации по длине трубопровода. В результате сравнительного анализа применимости методов выявления нарушения целостности МТ [4] выбран метод, базирующийся на контроле трендов давления с оценкой линий гидравлического уклона.

III. Диагностическая модель оценки целостности МТ

В работе [5] предлагается ряд подходов, базирующихся на методе гидравлической локации утечки. Для оценки гидравлического профиля выбирается линейный участок трубопровода между двумя точка контроля давления с двумя промежуточными точками. Строится гидравлическая характеристика H(x):

$$H(x) = \frac{P(x)}{\rho g} + z(x) \qquad (1)$$

где x – координата по длине трубопровода, P(x) – давление в контрольных точках вдоль трубопровода, Па, ρ – плотность перекачиваемой нефти, кг/м3, g – ускорение свободного падения м/с2. На рис. 2 показана прямолинейная зависимость Нбу1 – линия гидравлического уклона без утечки. В точке появления разгерметизации возникает излом линии H(x). Для его выявления строятся две линии гидравлического уклона Ну1 и Ну2. Тогда, если давление в начале и в конце трубопровода не совпадает, то координата точки утечки на участке может быть найдена геометрическим методом через координаты линий гидравлического уклона [5]:

$$\xi = \frac{(x_2 - x_1)\cdot(x_4\cdot\Delta P_3 - x_3\cdot\Delta P_4) - (x_4 - x_3)\cdot(x_2\cdot\Delta P_1 - x_1\cdot\Delta P_2)}{(x_2 - x_1)\cdot(\Delta P_3 - \Delta P_4) + (x_4 - x_3)\cdot(\Delta P_2 - \Delta P_1)} \qquad (2)$$

ΔP_1 – ΔP_4 – перепад давления в соответствующих точках измерения X1-X4. Метод имеет ряд недостатков: значения давления на концах трубопровода меняются незначительно и требуются высокоточные средства измерения давления, низкая чувствительность к изменению скорости потока. Поэтому реальная координата точки утечки может быть смещена. Как показывают исследования автора [5] ошибка может составить до 7 %, что на отрезке трубопровода в 50 км соответствует 3,5 км. Поэтому предлагается использовать комбинированную модель, в которой для уточнения координаты местоположения отказа используется обобщенный критерий, имеющий накопительный эффект влияния внешних воздействий на остаточный ресурс трубопровода.

МТ оборудуются современной системой катодной защиты с возможностью вывода информации о значении потенциала с контрольных пунктов и с возможностью отображения уставки по напряжению и току на катодных станциях. Контрольные пункты расположены по длине трубопровода неравномерно, что объясняется особенностью прокладки и спецификой грунта. Значение потенциала понижается к середине участка, так как станции катодной защиты располагаются на концах рассматриваемого 50 км участка (рис. 1). В руководящих материалах приводятся допустимые границы изменения потенциала, выходить за которые нельзя, так как либо будет ослаблено действие катодной защиты, либо при переизбытке потенциала начнётся разрушение материала трубопровода. Вводится составляющая критерия, которая объединяет степень превышения потенциала, время действия и площадь распространения:

$$K_V = \frac{\sum S_T \cdot \Delta\tau \cdot \Delta U}{K_{V\max}}, \qquad (3)$$

где $\Delta U = U_{min} - U(t) > 0$ – отклонение потенциала ниже минимально допустимого порога и работа трубопровода без защиты; $\Delta\tau$ – шаг квантования по времени; S_T – площадь поверхности трубопровода без защиты, K_{Vmax} – максимальное значение критерия на всем диапазоне рассматриваемого участка по всем контрольным пунктам.

Усиление коррозийных процессов наступает, когда плотность тока катодной защиты $I_{КЗ}$ меньше плотности тока по кислороду I_{O2}. Рост стресс-коррозии идет при воздействии катодного водорода. Так как катод является сильным восстановителем, то при превышении плотности по кислороду I_{O2} более чем в 5 раз интенсифицируется процесс захвата молекул воды на внешней поверхности (эффект катодной перезащиты) [6]. В качестве составляющей критерия на отношения плотности тока принимается выражение

$$K_I = \sum\left(I_{КЗ} \Big/ I_{O2}\right)\Delta\tau \qquad (4)$$

Периодически проводится обследование трассы залегания подземной части МТ с применением

портативного оборудования и формируется карта грунтов с указанием их удельного электрического сопротивления $\rho_{гр}$. Влияние кислотности можно увидеть по проседанию потенциала в зоне действия. В качестве составляющей критерия предлагается применить:

$$K_{\rho} = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (5)$$

где ρ – значение электрического сопротивления грунта при последнем исследовании, ρ_{min} и ρ_{max} – предельно возможные значения электрического сопротивления грунта для данного типа почвы. Если значение ρ выходит за указанный диапазон, то критерий принимает значение 0 или 1 соответственно.

С целью обобщения результатов внутритрубной диагностики за основу были взяты данные с магнитного дефектоскопа. По результатам экспертного опроса набор выявляемых дефектов ранжирован по степени опасности и выделено 3 группы (1 группа – максимальная опасность). При расшифровке результатов сканирования система показывает области повреждения и их характер, который обрабатывается в специальном программном обеспечении и имеет количественные оценки, на основе которых формируется последняя составляющая критерия:

$$K_{ТП} = \frac{S_{И}}{S_{П}}\left(\frac{\Delta S_{П}(t)/\Delta\tau(t)}{\Delta S_{П}(t-1)/\Delta\tau(t-1)}\right) \quad (6)$$

где $S_{И}$ – доля площади повреждения с интенсивным разрушением стенки трубопровода, $S_{П}$ – площадь повреждения выявленная при обработке результатов сканирования внутренней поверхности трубы в данной точке контроля, $\Delta S_{П}(t)/\Delta\tau(t)$ и $\Delta S_{П}(t\text{-}1)/\Delta\tau(-t)$ – скорость увеличения площади повреждения за межпроверочный интервал Δτ при текущем t и предыдущем t-1 проходах снаряда.

Обобщенный критерий вычисляется через формулу коэффициента уверенности, которая позволяет сочетать новую информацию со старыми результатами [7]

$$K_{O}(K_i, K_j) = K_i + K_j(1 - K_i) \quad (7)$$

где $K_i, K_j \in [K_V, K_I, K_{\rho}, K_{ТП}]$. Комбинирование более, двух составляющих критерия осуществляется через повторное вычисление по этой формуле, так как она допускает коммутативность событий $K(K_1, K_2) = K(K_2, K_1)$.

IV. Анализ результатов имитационного моделирования

Расчет профиля давления по контрольным точкам установки крановых узлов выполнен в пакете Matlab Simulink, где разработана математическая модель линейного участка МТ, в которой использована усовершенствованная библиотека стандартных функций SimHydraulics и библиотека усовершенствованных – MyHydroLib [8].

Для демонстрации работы диагностической модели сгенерирована утечка 5 % от максимального расхода на выходе трубопровода между К2 и К3. В табл. 1 приведены результаты расчета изменения профиля линий гидравлического уклона, а на рисунке 2 – их графическая интерпретация с сопоставлением излома линий Ну1 и Ну2 и первоначальной линии гидравлического уклона Нбу.

ТАБЛИЦА I. Результаты расчета гидравлического уклона трубопровода при появлении утечки

Наименование	Ед. изм	Координаты по длине трубопровода					
Координаты	-	X6	X5	X4	X3	X2	X1
Географическая точка	км	50	38	34	28	4	0
Геометрический профиль	м	62	50	57	32	35	27
Давление после возникновения утечки	МПа	1,6	1,3	1,27	1,06	0.98	1,1
Гидравлический уклон	м	-	-	209	159	152	153

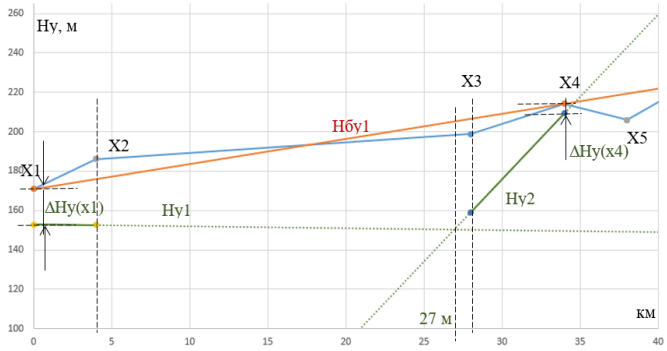


Рис. 2. Профили гидравлического уклона линейного участка МТ

Координата точки пересечения Ну1 и Ну2 была рассчитана по формуле (2) и составила 27,2 км. Для уточнения местоположения точки утечки, при учете влияния внешних факторов на целостность трубопровода, вычисляется значение обобщенного критерия K_O для области, окружающей расчетное значение пересечения линий гидравлического уклона с шагом, привязанным к дискретности расшифровки карты внутритрубной диагностики и кислотности грунта.

На рис. 3 показано схематичное изображение выбранного участка трубопровода, на котором отмечены обнаруженные дефекты.

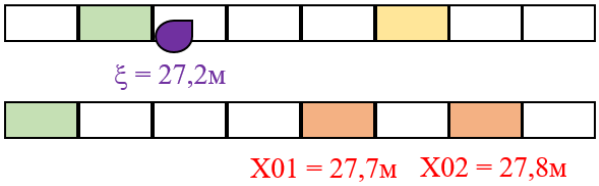


Рис. 3. Схематичное изображение трубопровода с обнаруженными дефектами

Фиолетовой точкой обозначена рассчитанная координата. Поскольку в этом месте повреждений целостности не наблюдается, наиболее вероятна разгерметизация в точках, где ранее были обнаружены начальные развития дефекта или велись восстановительные работы. В связи с тем, что таких точек несколько, необходимо ранжировать их по

дополнительным показателям, для этого был рассчитан обобщённый критерий по (7). Наибольшее значение было получено в точке с координатой 27,7 м. Оно составило 0,9597 в противовес 0,8466, найденным для координаты 27,8 м. Таким образом, в качестве приоритетного местоположения разгерметизации выбирается координата X01 = 27,7 м, по максимуму обобщенного критерия.

V. Заключение

Выбор способа диагностики состояния МТ определяется частотой аварий определенного типа и уровнем технического обеспечения. Для подземной прокладки линейного участка с типовым набором измеряемых параметров предложена комбинированная диагностическая модель, предназначенная для решения задачи локализации места утечки. За основу принят метод оценки профиля гидравлического уклона с уточнением координаты точки утечки по предлагаемому обобщенному критерию, аккумулирующему условия и уровень эксплуатации участка МТ в заданному радиусе вокруг расчетной координаты точки утечки.

Список литературы

[1] Васильев Т.Г. Трубопроводный транспорт нефти: учеб. для вузов в 2-х т. / под ред. С.М. Вайнштока; М. : Недра-Бизнесцентр, 2012. Т.1. 407 с.

[2] Поникаров С.И. Анализ причин возникновения аварий на магистральных нефтепроводах / С.И. Поникаров, В.А. Алексеев, П.В. Вилохина, А.Ф. Маннанова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. №23. С. 365-368.

[3] Мамонова Т.Е. Методы диагностики линейной части нефтепроводов для обнаружения утечек // Проблемы информатики. 2012. №S3(17). С. 103-112.

[4] Романова К.О. Анализ методов обнаружения возмущений в магистральных нефтепроводах // Вестник магистратуры. 2022. №4-4(127). С. 32-34.

[5] Мамонова Т.Е. Определение параметров утечки из нефтепровода по разности во времени давления в четырех контролируемых сечениях трубопровода // Автоматизация в промышленности. 2013. №10. С. 57-61.

[6] Хижняков В.И. определение опасности образования и роста коррозионных и стресс-коррозионных дефектов на основе анализа режимов катодной защиты магистральных газонефтепроводов / В.И. Хижняков, А.В. Негодин, В.С.Калиниченко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018, №5, С. 128-139.

[7] Моросанова Н.А. Формальные свойства схемы Шортлиффа / Н.А. Моросанова, С.Ю. Соловьев // Управление большими системами. Выпуск 36. С. 5-38.

[8] Агафонов Е.Д. Об особенностях использования системы Matlab/simhydraulics. В Matlab/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных нефтепроводов / Е.Д. Агафонов, Ю.Н. Безбородов, А.Г. Миронов // Информационные технологии. 2014. 5(20). С. 76-81.

Математическая модель процесса сжигания черного щелока в топке содорегенерационного котла

М. А. Новикова
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
marya.voropanova@yandex.ru

***Аннотация*. В статье приводятся основные сведения о содорегенерационных котлах и процессах, протекающих в них. Также в статье показана математическая модель зоны пиролиза.**

Ключевые слова: содорегенерационный котел; черный щелок; топка; математическая модель; зона пиролиза; зона окисления

I. Общие сведения о содорегенерациооных котлах

Содорегенерационный котлоагрегат (СРК) является важным элементом цикла регенерации химикатов сульфат-целлюлозного производства и предназначен для регенерации (т. е. восстановления свойств) чёрного щёлока, отработанного в процессе варки [1]. Свою историю содорегенерационные котлоагрегаты начинают в 1933 году [2]. За счет регенерации химикатов и использования теплоты органических компонентов он существенно снизил себестоимость сульфатной целлюлозы, которая по сравнению с сульфитной имеет большую механическую прочность. Современные СРК (рис. 1) имеют более высокую производительность, являются более экологичными и безопасными. СРК, показанный на рис. 1, состоит из поверхностей теплопередачи, изготовленных из стальных труб, топки (1), пароперегревателей (2), блока генерации котла (3) и экономайзеров (4). Конструкция парового барабана (5) относится к однобарабанному типу. Воздух и черный щелок вводятся через отверстия для первичного и вторичного воздуха (6), щелочные пистолеты (7) и отверстия для третичного воздуха (8). Остатки горения, плав, выходят через летки плава (9) в бак-растворитель плава (10). Структурная схема технологического процесса представлена на рис. 2.

Процесс работы СРК состоит из нескольких единичных процессов:

- сжигание органического сырья в черном щелоке с получением пара;
- восстановление неорганических соединений серы до сульфида натрия;
- получение неорганического плава, и его растворение в слабом белом щелоке для получения зеленого щелока;
- извлечение неорганической пыли из дымовых газов для экономии химических веществ;
- получение натриевого дыма для улавливания остатков сгорания выделяющихся соединений серы.

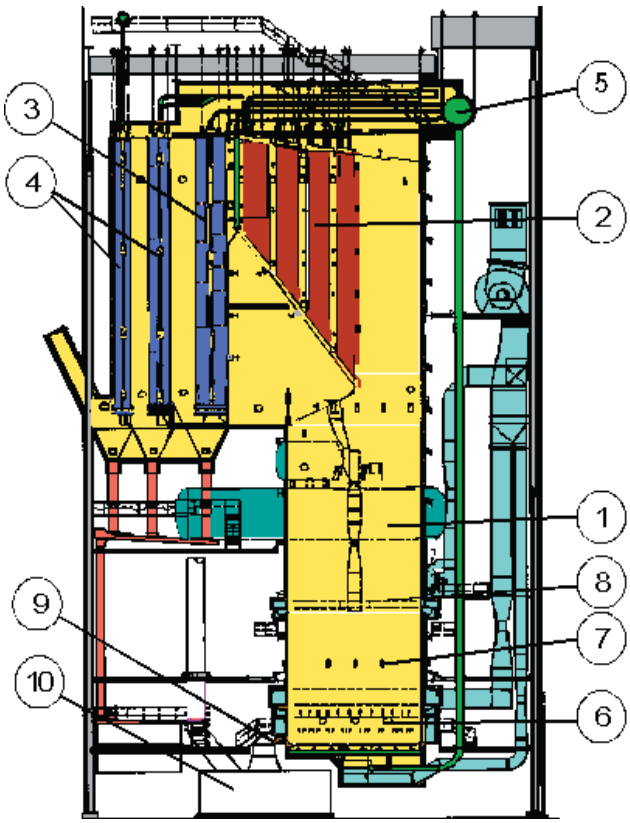


Рис. 1. Конструкция современного СРК [3]

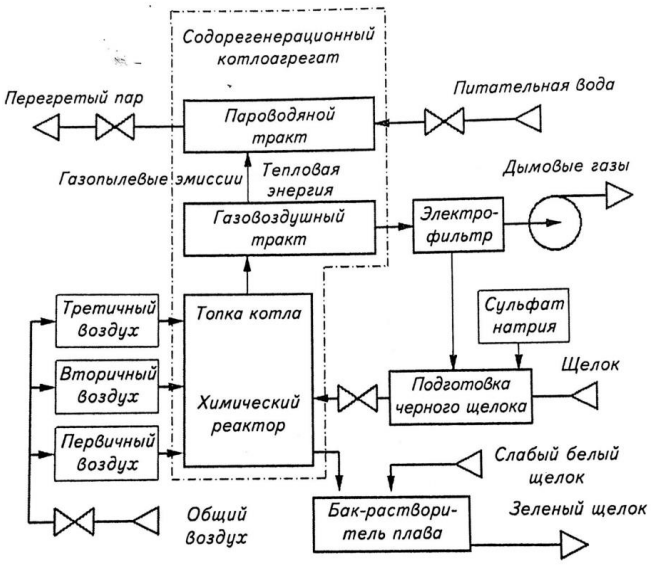


Рис. 2. Структурная схема технологического процесса СРК [4]

Главной задачей при обслуживании СРК является достижение максимальной эффективности при регенерации черного щелока в условии его наиболее экономичного сжигания. По этой причине, топочный процесс организован на комбинировании факельного способа сжигания (в объёме топки) и на поду (в огарке).

Топочное пространство СРК принято разделять на три зоны по уровням подачи воздуха:

- ввод первичного воздуха – зона восстановления;
- ввод вторичного воздуха – зона пиролиза;
- ввод третичного воздуха – зона окисления.

В последние годы на целлюлозно-бумажных комбинатах ставится задача достичь максимального КПД от СРК. Одним из способов для выполнения данной цели является снижение испарения сульфата и механического уноса частиц щелока топочным газом. В [5] авторы указывают, что 70 – 85 % уноса – сульфат натрия. Процент его содержания в уносе увеличивается в процессе движения газов по газоходам котла. 10 – 15 % уноса составляет карбонат натрия и 4 – 5 % – сажа. Житков В.В. в [6] указывает, что для расчета количества испаряющегося сульфата можно использовать формулу:

$$N_{ун} = 0,268 \cdot 10^{10} exp\left(-\frac{38700}{T_{ос}}\right) Q_0^{Na_2SO_4} F_T \frac{G_{ПС}^{Na_2SO_4}}{G_{ПС}^{Na_2SO_4} + 1,06 G_{ПС}^{Na_2CO_3}},$$

где:

- $T_{ос}$ – температура поверхности слоя огарка, $O_к$;
- Q_o^{Na2SO4} – количество сульфата, поступающего в слой в течение часа, кмоль;
- F_T – поверхность испарения, принятая равной площади горизонтального сечения топки, м^2;
- $G_{пс}^{Na2SO4}$, $G_{пс}^{Na2CO3}$ – расход сульфата и карбоната натрия в слой, к/моль.

Для того, чтобы оценить состав огарка, который оседает на поду (дне) топки, а также величины механического уноса в соответствии с [6] следует использовать уравнения горизонтальной и вертикальной составляющих скорости движения частиц в топке:

$$dU_x/d\tau = A_x(\delta,\tau)U_x$$

$$dU_y/d\tau = A_y(\delta,\tau)(U_y - U_г) + B_y(\delta,\tau)U_y \pm 9,81,$$

где:

- $A_x(\delta,\tau)$, $A_y(\delta,\tau)$, $B_y(\delta,\tau)$ – переменные коэффициенты;
- δ – диаметр частиц, мм;
- τ – время, с.

Следует учитывать, что размер частиц различен, хотя и находится в границах фракционного состава распыла, при разных положениях качающейся механической форсунки в пределах полного времени сушки. Более того, размер частиц изменяется в процессе их нахождения в топке. На рис. 3 показаны изменение размеров частиц в процессе сушки в топке СРК.

Во время горения, черный щелок набухает. Никакое другое промышленное топливо при сгорании не набухает так сильно, как черный щелок.

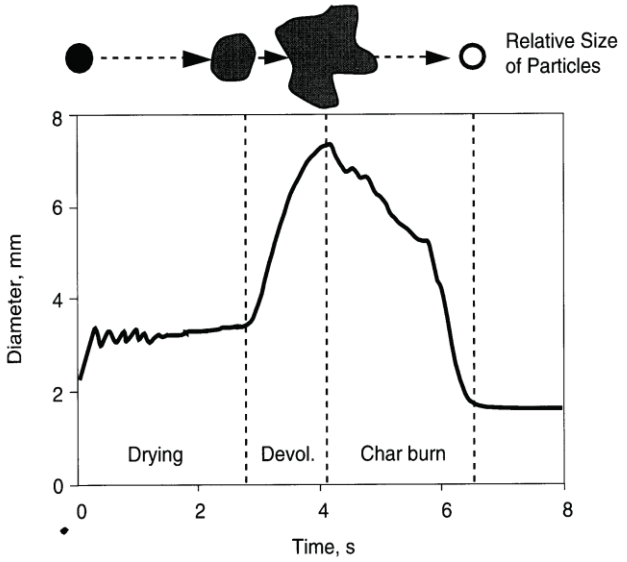


Рис. 3. Характерное поведение черного щелока при горении [3]

Набухание обусловлено высоким выходом летучих веществ и подходящими свойствами поверхности. Порядок различных стадий сжигания показан вертикальными линиями на рис. 3. В действительности стадии горения несколько перекрываются, по крайней мере, для более крупных капель. Причиной этого является разная скорость горения в разных частях капель. В то время как черный щелок может быть уже сухим и подвергаться выделению летучих веществ на поверхности, сушка в центре капель не завершена [3].

На рис. 4 показана зависимость «набухания» частиц от времени горения органических веществ – черного щелока (исследование для одиночных капель при температуре 800 °С).

Скорость реакций горения увеличивается при более высоком набухании. Это можно объяснить большей доступной площадью поверхности для сильно набухающих частиц черного щелока. Бэкман и др. (1996) обнаружили, что набухание и время горения органических веществ коррелируют для типичных производственных растворов. Название зависит от специфических свойств щелока. Набухание уменьшается с повышением температуры топки [3].

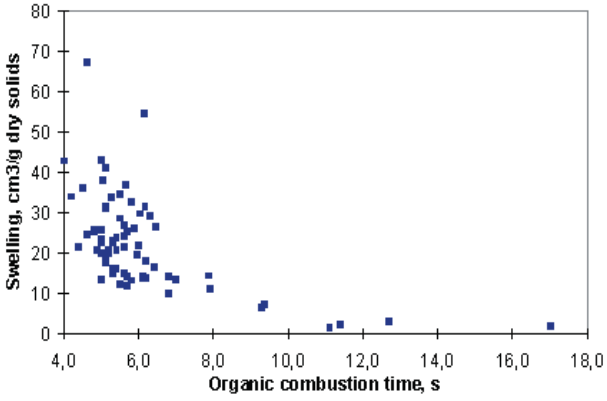


Рис. 4. Зависимость набухания частиц от времени горения органических веществ [3]

Результаты исследований [6] говорят о том, что в момент завершения сушки большинство частиц щелока находится во взвешенном состоянии. Отсюда следует,

что частицы, скорость которых меньше средней скорости газов, будут уноситься из топки. Но во время полета в них произойдут химические превращения, а следовательно, изменится их масса, размер и скорость витания. Поэтому проводились дополнительные расчеты скорости витания частиц (с допущениями, что они сферической формы и при условии полного выгорания углерода из сухого остатка, карбонизации щелока, окисления сульфида, плавления минеральной части). В результате было получено, что механический унос составляет частицы золы с диаметром $\delta_{зу}$, равный диаметру исходных капель щелока δ_y. Таким образом, с помощью интеграла Гаусса возможно определить механический унос химикатов:

$$N_{ум} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{t_{min}}^{t_y} e^{-t^2} \mathrm{d}t \ ,$$

где:

- t – параметр, зависящий от диаметра капли и характеристики форсунки;
- t_{min}, t_y – значение параметра t, соответствующее наименьшему и максимальному диаметрам уносимых капель.

II. Математическая модель процессов в зоне пиролиза

Наиболее значимым в СРК является процесс в зоне пиролиза, поскольку именно от него в большей степени зависит эффективность сжигания черного щелока и восстановления сульфата в топке. В зоне пиролиза выделяется большая часть тепла, подводимого с топливом, развивается наиболее высокая температура по сравнению с температурой в других частях топочной камеры.

Входными параметрами, которые определяют процессы в зоне пиролиза, являются расход и состав черного щелока и вспомогательного вещества, их температура, расход сульфата, расход первичного воздуха (который определяется по соотношению первичный воздух/общий воздух), температура воздуха и расход газа из слоя.

Выходными параметрами являются состав и температура газообразных продуктов сгорания черного щелока, которые уходят в зону окисления, и огарка, который образует подушку на поду топки.

В описываемой математической модели сделаны следующие допущения:

- в зоне пиролиза испаряется вся влага топлива;
- огарок нагревается до температуры газов в зоне, а минеральные соли плавятся;
- щелочь полностью карбонизируется в соответствии с реакцией $2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O$, в то время как сульфид натрия окисляется по реакции $Na_2S + 2O_2 = Na_2SO_4$;
- зона пиролиза – это объект с сосредоточенными параметрами.

Математическая модель процессов в зоне пиролиза представляется с помощью системы уравнений, которые учитывают баланс веществ в конденсированной и газовой фазе, баланс тепла, равновесие реакции конверсии окиси углерода водяным паром и равенство атмосферному полного давления газов:

баланс углерода

$$V_{\Sigma}^{n}\left(P_n^{CO_2} + P_n^{CO} \right) = 0,0187 C_p - 0,0028 A_p^{n\Sigma}$$

баланс водорода

$$V_{\Sigma}^{n}\left(P_n^{H_2O} + P_n^{H_2} \right) = 0,112 H_p + 0,0124 W_p - 0,0028 A_p^{n\Sigma}$$

баланс кислорода

$$V_{\Sigma}^{n}\left[P_n^{CO_2} + P_n^{SO_2} + 0,5\left(P_n^{H_2O} + P_n^{CO} \right) \right] = 0,21 \alpha_T V_0 \beta + 0,007 O_p + \\ + 0,00622 W_p + 0,000622 \alpha_T d V_0 \beta + 0,00315 \zeta_н A_p^s - 0,0014 A_p^{n\Sigma} - 0,00574 A_p^{сд}$$

баланс серы

$$V_{\Sigma}^{n} p_n^{SO_2} = 0,007 S_p^{орг}$$

баланс азота

$$V_{\Sigma}^{n} p_n^{N_2} = 0,79 \alpha_T V_0 \beta + 0,008 N_p$$

константа равновесия реакции конверсии окиси углерода водяным паром

$$K_p = \frac{P_n^{CO_2} \cdot P_n^{H_2}}{P_n^{H_2O} \cdot P_n^{CO}}$$

$$lg K_p = - \frac{\Delta G_0}{2,303 R T_n} = \frac{1693,6}{T_n} = 1,5725$$

полное давление газов

$$P_n^{H_2O} + P_n^{CO_2} + P_n^{CO} + P_n^{H_2} + P_n^{SO_2} + P_n^{N_2} = 1$$

баланс тепла

$$Q_p^p + 44,8 C_p^{CO_2} \frac{G_{nc}^{Na_2SO_4}}{B_p} t_n = \left(\frac{V_{\Sigma}^n}{22,4} \sum_j C_p^j P_n^j + \frac{1}{B_p} \sum_n C_p^n G_{nc}^n \right) t_n + \\ + \sum_i \lambda_{nл}^i \frac{A_p^i}{100 \mu_i} + V_{\Sigma}^{n}\left(3018 P_n^{CO} + 2579 P_n^{H_2} \right) + 97200 \frac{G_{nc}^n}{B_p} + \\ + \frac{K_{nэ} F_{nэ}}{B_p}\left(t_n - t_s \right) + \frac{K_{no} F_T}{B_p}\left(t_p - t_o \right)$$

В приведенной системе уравнений обозначено:

- A_p^i – содержание на рабочую массу условной топливной смеси: сульфата, сульфида и карбоната натрия с учетом карбоната, образующегося в щелочи, %;
- C_p, H_p, N_p, O_p, S_p^{opr}, W_p – элементарный состав и влажность рабочей массы условной топливной смеси, %;
- P_n^i – давление i-го вещества;
- C_p^j, C_p^n – мольная теплоемкость газов и конденсированных веществ, ккал/кмоль;
- d – влажность дутьевого воздуха, г/нм^3;
- $\varsigma_н$ – степень восстановления сульфата на выходе из слоя;

- ΔG_0 – стандартное изменение энергии Гиббса;
- $F_{пэ}$ – поверхность нагрева топочных экранов в зоне пиролиза, м^2;
- $K_{пэ}$, $K_{по}$ – коэффициент теплопередачи от газов зоны пиролиза экранам и в окислительную зону, ккал/(м^2.час.град.);
- $t_п$, t_o – температура газов в зоне пиролиза и в зоне окисления, ^{o}C;
- t_s – температура наружной поверхности стенки экранной трубы, ^{o}C;
- V_Σ^n – полный объем газообразных продуктов сгорания в зоне пиролиза, нм^3/кг;
- V_o – теоретический объем воздуха, необходимого для полного сгорания 1 кг условной топливной смеси, нм^3/кг;
- α_T – коэффициент избытка воздуха в топке;
- β – соотношение первичного воздуха к общему воздуху;
- $\lambda_{пл}^i$ – теплота плавления i-го вещества, ккал/моль;
- μ_i – молекулярный вес i-го вещества;
- $G_{пс}^{Na2SO4}$ – расход сульфата натрия в слой, к/моль;
- $B_р$ – расход топливной смеси в топку, кг/ч.

Для зоны окисления математическая модель будет аналогичной. Отличие будет заключаться лишь в том, что в зоне окисления отсутствуют конденсированные вещества (за исключением химикатов в уносе из зоны пиролиза), а в газовой фазе содержится свободный кислород. Входными данными для математической модели зоны окисления будут состав и температура газа в зоне пиролиза.

III. Заключение

Описанные в статье данные могут быть полезны при дальнейшей разработке динамических моделей зон пиролиза и окисления. Для этого нужно проводить дополнительные эксперименты и исследования.

Список литературы

[1] Ковалев Д.А. Анализ возможных нарушений технологических процессов в содорегенерационном котле // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56(82). С. 108-111. DOI 10.36807/1998-9849-2020-56-82-108-111. EDN WYMCWM.

[2] Кряжев А.М. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона / А.М. Кряжев, О.В. Голуб, А.Ю. Санжаровский // Энциклопедия технологий 2.0: Производство неметаллов. – Москва; Санкт-Петербург: Научно-исследовательский институт "Центр экологической промышленной политики", 2022. С. 319-463. EDN RBDIMV.

[3] Esa K. Vakkilainen, Kraft recovery boilers – Principles and practice. Valopaino Oy, 2005. 254 c. ISBN: 952-918-603-7.

[4] Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. III. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 1. Автоматизация, стандартизация и экономика в ЦБП. СПб.: Политехника, 2008. 621 с.

[5] Иванов Ю.С., Кузнецов А.Г., Новожилов В.В., Технология целлюлозы. Промывка и отбелка целлюлозы. Регенерация химикатов. Технологические расчеты: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. Ч. II. 86 с. ISBN: 978-91646-187-9.

[6] Житков В.В. Исследование процесса сжигания черного щелока в топках содорегенерационных агрегатов впрыскивающего типа: автореф. дис. … канд. техн. наук / Ленуприздат. Ленинград, 1973. 21 с.

Исследование управляемых процессов биоочистки сточных вод с использованием модели ASM1

А. В. Андреев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
a-sanya01@mail.ru

***Аннотация*. Представлены результаты исследований управляемых процессов для модели ASM1 с реализацией ПИ-регулирования.**

Ключевые слова: бактерии-нитрификаторы, гетеротрофы, регулирование, очистка, реактор

I. Введение

В животноводческом комплексе ИДАВАНГ Агро, занимающимся выращиванием свиней есть потребность очистки стоков. Присутствующая на предприятии система очистки, описанная подробнее в [1], справляется с поставленными задачами, но имеет недостаток – на начальных стадиях очистки стоков от химических примесей в атмосферу здания начинает выделятся аммиак. Подобное выделение аммиака в течение длительного времени негативно сказывается на технике, что приводит к приостановке процесса очистки на химическом этапе. Таким образом, если выявление проблемы займет продолжительное время, то процессы очистки остановится уже на предыдущем механическом этапе.

Учитывая описанную проблему, имеет смысл в качестве альтернативы рассматривать биологическую очистку стоков, которая лишена данного недостатка. Как было отмечено в [2], данный тип очистки уже применялся на рассматриваемом предприятии, но оно имело другое название и было под другим собственником.

II. Описание модели и данных

В качестве базовой модели биологической очистки принимается модель активного ила 1 (Activated Sludge Model 1 или ASM1).

Для рассмотрения модели с предприятия были получены следующие данные:

$\boldsymbol{S_o^{\text{вх}} = 6\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – входная концентрация растворенного кислорода,

$\boldsymbol{S_{nh}^{\text{вх}} = 30\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – входная концентрация аммонийного азота,

$\boldsymbol{S_{no}^{\text{вх}} = 18.6\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – входная концентрация нитратного азота,

$\boldsymbol{S_{ph}^{\text{вх}} = 6.5\ {}^{\text{экв}}/_{\text{м}^3}}$ – входное значение щелочности,

$\boldsymbol{V = 2700\ \text{м}^3}$ – объем реактора.

Константы насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий, а также само математическое описание модели были взяты из [3].

III. Описание предыдущих результатов

Ниже приведено содержание исследований, произведённых при помощи [3], и описанных в [2] и [4], вместе с выделенными закономерностями.

Поскольку сама модель ASM1 является достаточно сложной, то имеет смысл исследовать сначала ее упрощенные вариации, а именно модель процессов нитрификации и модель процессов денитрификации, после чего исследовать модель ASM1.

В результате исследования процессов по отдельным моделям путем изменения входных параметров ($S_o^{\text{вх}}$, $S_{nh}^{\text{вх}}$, $S_{no}^{\text{вх}}$, $S_{ph}^{\text{вх}}$) были сделаны выводы, что бактерии-нитрификаторы (относятся к процессу нитрификации) питаются за счет кислорода и аммонийного азота, производя нитратный азот, а гетеротрофы (относятся к процессу денитрификации) питаются за счет Растворенного Биологически Разлагаемого Органического Вещества, аммонийного и нитратного азота, влияя опосредованно на рост аммонийного азота;

Изменяя те, или иные параметры на входе можно управлять процессом роста организмов и, таким образом, процессом очистки. Вместе с тем на практике зачастую отсутствует возможность контролировать большую часть входных параметров ($S_o^{\text{вх}}$, $S_{nh}^{\text{вх}}$, $S_{no}^{\text{вх}}$, $S_{ph}^{\text{вх}}$): они зависят от самой химической загрязненности стоков в текущий момент. Потому единственным параметром, который можно изменять является входная концентрация подачи стоков: $Q^{\text{вх}}$ (единицы измерения ${}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$). В результате управление в системе с биологической очисткой осуществляется путем изменения данного параметра.

Самой же целью управления является одновременное достижение по окончании очистки параметрами аммонийного и нитратного азота, а также химического потребления кислорода (далее ХПК) концентраций равных предельно-допустимым концентрациям (далее ПДК) или ниже. ПДК указаны в [3] и составляют:

$\boldsymbol{S_{nh}^{\text{ПДК}} = 2\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – для аммонийного азота,

$\boldsymbol{S_{no}^{\text{ПДК}} = 10\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – для нитратного азота,

$\boldsymbol{S_{COD}^{\text{ПДК}} = 30\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}}$ – для ХПК (не рассматривается на объекте).

С целью определения возможности очистки в [4] было проведено компьютерное моделирование модели ASM1 с

входными параметрами предприятия при помощи языка программирования Python и соответствующих библиотек. При самом моделировании осуществлялось увеличение параметра $Q^{вх}$ и запись в массив установившихся концентраций веществ, затем по полученным данным строились графики веществ. На рис. 1 отображены концентрации аммонийного азота (S_nh_уст) и нитратного азота (S_no_уст), а на рис. 2 – концентрации бактерий-нитрификаторов (X_ba_уст) и гетеротрофов (X_bh_уст).

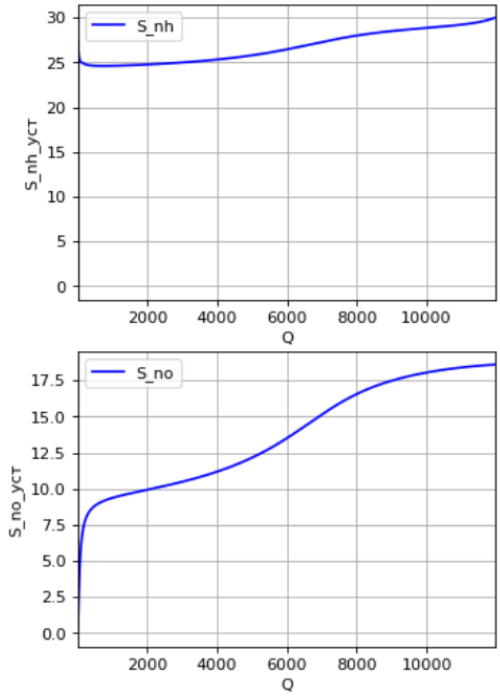


Рис. 1. Графики изменения концентраций аммонийного и нитратного азота в зависимости от входной подачи стоков

Как можно наблюдать на рис. 1, согласно модели ASM1 отсутствует такое $Q^{вх}$, при котором аммонийный азот (S_{nh}) был равен или ниже ПДК. То есть один параметр всегда не удовлетворяет ПДК.

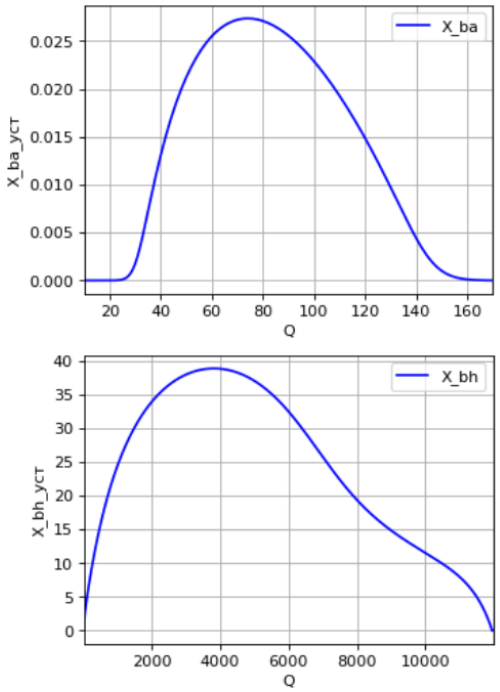


Рис. 2. Графики изменения бактерий в зависимости от входной подачи стоков

На рис. 2 можно наблюдать, что при $Q^{вх} = 74\ {}^{м^3}/_{сут}$ концентрация бактерий-нитрификаторов максимальна, а при $Q^{вх} \approx 4000\ {}^{м^3}/_{сут}$ максимальна концентрация гетеротрофов, но в данном случае бактерии-нитрификаторы отсутствуют в реакторе. Поскольку для осуществления биологической очистки необходимо присутствие как процесса нитрификации, так и денитрификации, то оптимальным значением для очистки по модели ASM1 и рассматриваемым параметрам является $Q^{вх} = 74\ {}^{м^3}/_{сут}$. Однако, как уже было выяснено по результатам на рис. 1, невозможно осуществить очистку в пределах ПДК. Подобное явление связано как раз с тем, что необходимо обеспечивать максимум бактерий, в то же время два разных вида бактерий достигают максимума при различных $Q^{вх}$, и затем уменьшаются до нуля, поскольку условия для существования бактерий-нитрификаторов не являются удовлетворительными для гетеротрофов за счет того, что первые аэробны (нуждаются в кислороде), а последние анаэробны (не нуждаются в кислороде, но нуждаются в нитратом азоте, производимым бактериями-нитрификаторами), т. е. для бактерий-нитрификаторов необходимо больше кислорода, чем его есть в стоках. Следовательно, имеется необходимость деления реактора на зоны: нитрификации (куда будет поставляться дополнительный кислород) и денитрификации.

В ходе исследований было выяснено, что наилучшей конструкцией является трехзонный реактор ДНД-типа (т. е. с последовательными зонами денитрификации, нитрификации и денитрификации, необходимость второй зоны денитрификации вызвана необходимостью фильтрации кислорода перед подачей возвратного потока в первую зону) с мембранным блоком (его цель отделить биомассу от уже отчищенной воды, сама биомасса далее участвует в процессе очистки). При параметрах $Q^{вх} = 45\ {}^{м^3}/_{сут}; Q^r = 300\ {}^{м^3}/_{сут}; Q^{ret} = 546 = {}^{м^3}/_{сут}$ (Q^r – возвратный поток из третьей зоны в первую; Q^{ret} – поток из мембранного блока в реактор) удалось достичь результатов в пределах ПДК, что отображено на рис. 3.

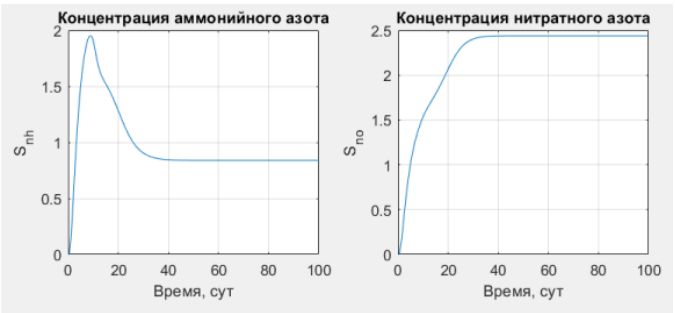


Рис. 3. Графики изменения концентраций аммонийного и нитратного азота с течением времени

Как можно наблюдать на рис. 3, концентрация аммонийного азота устанавливается на значении ниже $S_{nh} = 1\ {}^{г}/_{м^3}$, а нитратного азота около значения $S_{no} = 2.5\ {}^{г}/_{м^3}$.

IV. Описание метода решения проблемы

Следует отметить, что управление при исследовании в [4] осуществлялось без регулятора. Однако его наличие необходимо, поскольку ручной подбор значения занимает много времени, а увеличение входных параметров при добавлении зон и мембранного блока лишь усложняет эту

задачу. Потому при изменении входных параметров быстрее будет произвести перенастройку регулятора, чем заново подбирать коэффициенты.

Вместе с тем, задача регулирования в рассматриваемой системе усложняется не только увеличением параметров, которыми можно управлять: в модели ASM1 управление происходит только при помощи $Q^{\text{вх}}$, а в модели реактора ДНД-типа с мембранным блоком на базе модели ASM1 управление дополняется величинами Q^r и Q^{ret}, – причем необходимо контролировать три параметра $(S_{nh}, S_{no}, S_{COD})$, в то время как один регулятор может отвечать только за один. Следовательно, в системе необходимо наличие девяти регуляторов: для величин $Q^{\text{вх}}$, Q^r и Q^{ret} по параметрам аммонийного азота, нитратного азота, и по ХПК, соответственно. Согласно [3] выбор для соответствующего параметра производится в сторону того регулятора, у которого входной сигнал имеет наименьшую ошибку.

В виду значительного масштаба работы было решено для начала реализовать регулирование для величины $Q^{\text{вх}}$ и только для модели ASM1 (без деления на зоны или учета мембранного блока). Целью является достижение результата, аналогичного ручной подаче $Q^{\text{вх}} = 74\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$, при которой рассматриваемые параметры устанавливаются на следующих значениях: $S_{nh}^{\text{уст}} = 25.24\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$; $S_{no}^{\text{уст}} = 4.42\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$; $S_{COD}^{\text{уст}} = 44.9\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$ – они и будут целевыми значениями для регулирования.

Для решения задачи регулирования будет рассматриваться ПИ-регулятор, настраиваемый по-отдельности для аммонийного азота, для нитратного азота и, наконец, ХПК. Алгоритм настройки следующий: пропорциональная составляющая будет изменятся до тех пор, пока контролируемый параметр в установившемся режиме не войдет в зону 5–10 % от целевого значения, после чего будет изменятся интегральная составляющая до достижения поставленной цели.

Следует отметить, что выходной сигнал регулятора также будет ограничиваться нелинейным звеном типа насыщение с целью ограничения нижнего порога нулем, ведь возможна ситуация, когда регулятор может установить значение входной подачи ниже нуля, т.е. математически результат будет корректен, однако не применим на практике.

V. Полученные результаты для модели ASM1

При регулировании системы по аммонийному азоту необходимо достигать значения $S_{nh}^{\text{зад}} = 25.24\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$. При настройке регулятора был сделан выбор в сторону настройки $P = I = 0$, поскольку при $P = 0$ установившееся значение контролируемого параметра уже отклоняется максимум на 5% от заданного ($S_{nh}^{\text{уст}} = 25.05\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$, $Q^{\text{вх,уст}} = 100\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$), однако повышение интегрального коэффициента приводит к тому, что $S_{nh}^{\text{уст}}$ начинает понижаться, т.е. отходить от заданного значения, а $Q^{\text{вх}}$ линейно возрастать, также начинают повышаться концентрации нитратного азота и ХПК что можно наблюдать на рис. 4 (синие графики соответствует настройке $P = I = 0$, другие цвета соответствуют $I > 0$).

При регулировании системы по нитратному азоту необходимо достигать значения $S_{no}^{\text{зад}} = 4.42\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$. При настройке регулятора был сделан выбор в сторону настройки $P = 101, I \in [2; 3]$, поскольку при $P = 101$ значение $S_{no}^{\text{уст}} = 4.64\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$ (в 5% зоне от заданного), в то же время при $I = 2 = 3$ установившееся значение $S_{no}^{\text{уст}} = S_{no}^{\text{зад}} = 4.42\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$, однако при $I = 2$ входной расход $Q^{\text{вх,уст}} = 74.01\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$, а при $I = 3$ входной расход $Q^{\text{вх,уст}} = 73.99\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$, потому $I \in [2; 3]$, ведь между данными значениями можно достигать

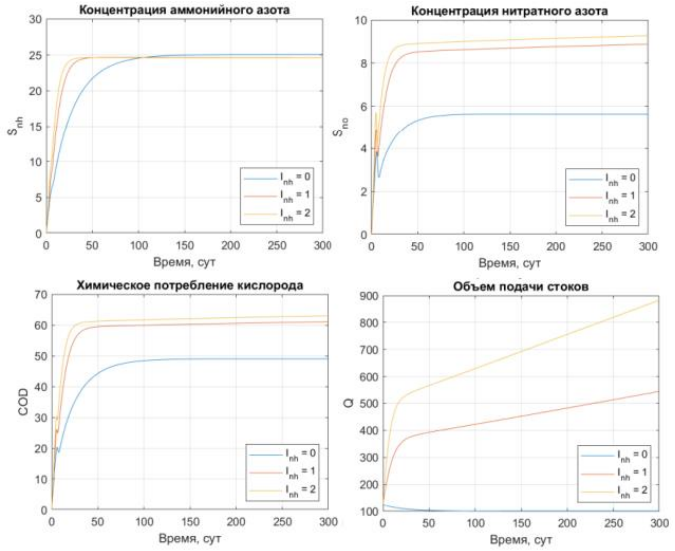


Рис. 4. Процессы в системе при регулировании по аммонийному азоту

$Q^{\text{вх,уст}} = 74\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$. Другие контролируемые параметры при настройке регулятора достигают $S_{nh}^{\text{уст}} = 25.25\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$ и $S_{COD}^{\text{уст}} = 44.88\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$, что близко к значениям $S_{nh}^{\text{уст}} = 25.24\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$; $S_{COD}^{\text{уст}} = 44.9\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$. Вышеописанный результат при регулировании по нитратному азоту представлен на рис. 5.

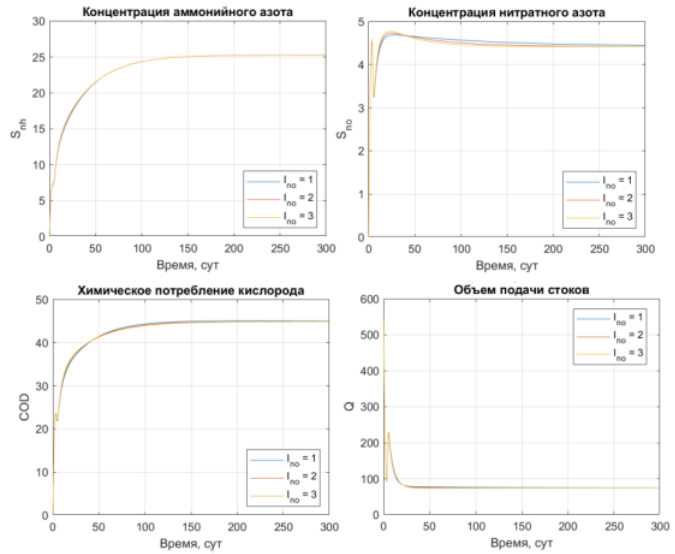


Рис. 5. Процессы в системе при регулировании по нитратному азоту

При регулировании системы по ХПК необходимо достигать $S_{COD}^{\text{зад}} = 44.9\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$. При настройке регулятора был сделан выбор в сторону настройки $P = 6, I \in [1; 3]$, поскольку при $P = 6$ значение $S_{COD}^{\text{уст}} = 47.14\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$ (в 5% зоне от заданного), а при $I \in [1; 3]$ $S_{COD}^{\text{уст}} = S_{COD}^{\text{зад}} = 44.9\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$, причем $Q^{\text{вх,уст}} = 74.64\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$, что близко к оптимальному $Q^{\text{вх}} = 74\ {}^{\text{м}^3}/_{\text{сут}}$, однако в системе

начинают возникать колебательно-затухающие процессы, которые повышаются при увеличении интегральной компоненты. Другие контролируемые параметры при настройке регулятора достигают $S_{nh}^{\text{уст}} = 25.1\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$ и $S_{no}^{\text{уст}} = 4.5\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$, что близко к значениям $S_{nh}^{\text{уст}} = 25.24\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$; $S_{no}^{\text{уст}} = 4.42\ {}^{\text{г}}/_{\text{м}^3}$. Вышеописанный результат по ХПК представлен на рис. 6.

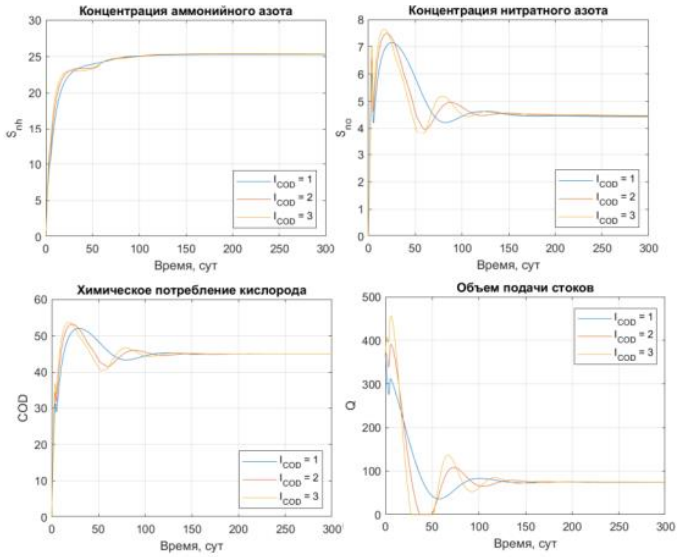


Рис. 6. Процессы в системе при регулировании по ХПК

VI. Заключение

В результате исследования управления для модели ASM1 можно отметить, что его реализация является достаточно сложной задачей, поскольку в дальнейшем предстоит распространить полученные результаты на модель трехзонного реактора с мембранным блоком.

Список литературы

[1] Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.] Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2021. С. 8-11. – Режим доступа к журн.: https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf

[2] Андреев А.В. Исследование биологической очистки на предприятии ИДАВАНГ Агро по моделям нитрификации, денитрификации и ASM1 // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.] Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2022. С. 11-14. – Режим доступа к журн.: https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2022/sbornik_2022_merged.pdf

[3] Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 231 с.

[4] Андреев А.В. Моделирование и управление технологическими процессами биологической очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро: ВКР бакалавра: 27.03.04. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2022. 117 с.

Разработка адаптивного интерфейса инфокоммуникационной системы предприятия

К. А. Четверикова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
ometvo@yandex.ru

***Аннотация*. В современном мире многие компании используют различные способы для обеспечения коммуникации между сотрудниками и хранения данных. Такая необходимость обусловлена тем, что многие рабочие вопросы требуют срочного получения ответа, а хранение документации в печатном виде в больших количествах усложняет поиск необходимой информации. Адаптация под современные проблемы ведения бизнеса и управления работой сотрудников приводит к тому, что категории и виды инфокоммуникационных систем расширяются вместе с их функциональными возможностями. Зачастую компаниям приходится интегрировать в работу сразу несколько разных систем, чтобы обеспечивать слаженную работу сотрудникам. Для упрощения и улучшения работы сотрудников и всего предприятия необходима инфокоммуникационная система, которая предоставит предприятию возможность хранения и доступа к информации и документации, обеспечит сотрудников коммуникацией и позволит вести работу над проектами, не переключаясь между различными программными обеспечениями или вкладками.**

Ключевые слова: инфокоммуникационные системы; разработка; требования; прототип; интерфейс

I. Инфокоммуникационные системы предприятия

Инфокоммуникационные системы предприятия (ИКС) – это комплекс средств, обеспечивающих связь между различными подразделениями предприятия, а также внутри подразделений. Они могут включать в себя сетевые технологии, базы данных, ПО для обработки и анализа данных. ИКС имеют обширный функционал, среди которого можно выделить следующие функции:

- обеспечение связи внутри подразделений компании и между ними;
- совместная работа подразделений;
- обработка и хранение информации и данных;
- оптимизация работы за счет автоматизации процессов;
- защита информации.

ИКС дают огромное преимущество предприятиям в сфере бизнеса. Они позволяют автоматизировать бизнес-процессы внутри предприятия, ускорить принятие решений и повысить эффективность работы. Одно из основных преимуществ ИКС – улучшение коммуникации сотрудников предприятия. Это достигается за счет обмена информацией, документацией, несмотря на время и локацию сотрудников.

Существует большое количество видов ИКС, и каждый имеет свои преимущества и особенности пользования. При выборе конкретной ИКС необходимо учитывать не только функциональность системы и соответствие целям предприятия, но и возможность интеграции с другими ИКС. Зачастую разные ИКС применяются в определенные моменты производственного цикла в информационном обеспечении предприятия. Одни из самых распространенных видов ИКС предприятий включают:

- электронная почта;
- корпоративные порталы;
- чаты и видеоконференции;
- информационные системы управления проектами.

Информационные системы управления проектами (ИСУП) представляют собой комплекс организационно-технологических, методических, технических, программных и информационных средств, обеспечивающих поддержку и повышение эффективности управления проектом [3]. ИСУП предоставляют достаточный функционал для внедрения в работу предприятия, поэтому необходимо провести сравнение существующих информационных систем управления проектами для определения функциональных и пользовательских требований к проектируемой системе.

Для анализа рынка готовых решений были выбраны следующие ИСУП: Jira, Trello, Яндекс.Трекер и Service Now. Для каждой системы были определены основные функциональные возможности, отраженные в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. Сравнение функциональных возможностей ИСУП

	Название ИСУП			
	Jira	***Trello***	***Яндекс. Трекер***	***Service Now***
Создание отчетов	+		+	+
Доски	+	+	+	+
Временная шкала	+	+	+	+
Архивирование проектов	+			
Управление пользователями	+	+		+
Интеграция	+	+		+
Автоматизация	+	+	+	
Планирование задач	+	+	+	+
План расходов				+

Каждая из систем имеет свои достоинства в сравнении с другими, но также между ними можно отметить много общего. Например, возможность

планирования задач, автоматизацию процессов, наличие досок Agile и временную шкалу. Однако на основании другого функционала получается, что система Trello подойдет для индивидуальной работы за счет отсутствия ограничений в бесплатной версии, а также для креативных маркетинговых команд или бизнес-команд. Другие же системы больше подойдут для команд разработчиков, так как имеют функционал, напрямую связанный с проектами, а именно формирование отчетов и подсчет затраченного на проект времени. Важным замечанием является то, что в данных системах отсутствует наличие чата между участниками проекта.

II. Требования к системе

Разработка требований к системе является неотъемлемой частью жизненного цикла проекта, который связан с созданием ПО. Процесс разработки требований позволяет определить, для чего нужна разрабатываемая система и какими функциями она должна обладать. Прежде чем разрабатывать требования, необходимо определить роли пользователей в системе. В качестве рассматриваемого отдела был выбран отдел разработки алгоритмического программного обеспечения (ПО), со следующими ролями пользователей в системе:

- начальник отдела разработки алгоритмического ПО;
- заместитель начальника отдела разработки алгоритмического ПО;
- менеджер проекта;
- начальник отдела разработки;
- начальник отдела тестирования;
- начальник отдела UI/UX;
- начальник отдела технической документации (ТД) и представления ПО;
- разработчик;
- тестировщик;
- UI/UX-дизайнер;
- работник отдела ТД и представления ПО.

Необходимо разработать пользовательские и функциональные требования, а также требования к интерфейсу.

Пользовательские требования – это описание того, что конечный пользователь ожидает от продукта или услуги, которую он будет использовать. Чтобы сформировать пользовательские требования, необходимо провести анализ рынка. Анализ поможет разработчикам определить, как продукт будет использоваться, какими функциями он должен обладать для удовлетворения потребностей пользователя.

Примеры разработанных пользовательских требований:

- у каждого пользователя должен быть индивидуальный логин;
- пользователь с ролью Заместитель начальника отдела разработки алгоритмического ПО, Начальник отдела разработки алгоритмического ПО имеет возможность выставлять роли пользователей;
- система должна содержать в себе следующие разделы: личный кабинет пользователя, проекты и сообщения;
- у пользователей с ролью Заместитель начальника отдела разработки алгоритмического ПО, Начальник отдела разработки алгоритмического ПО есть дополнительный раздел «Сотрудники»;
- при переходе на конкретный проект должна отображаться информация по проекту: бэклог проекта, временная шкала, а также вся сопутствующая документация, отчеты.

Функциональные требования – это описание того, как должна работать система. Для их описания также необходимо провести анализ рынка и определить основной функционал, который должен быть включен в разрабатываемую систему. В функциональных требованиях обычно описываются действия, которые должна выполнять система на основе совершаемых пользователем действий.

Примеры разработанных функциональных требований:

- вход в систему осуществляется с помощью логина и пароля;
- личный кабинет пользователя является главной страницей при открытии системы;
- при добавлении сотрудника необходимо заполнить следующие поля: его ФИО, адрес электронной почты, роль в системе;
- каждому исполнителю задачи должно приходить уведомление о появлении новой задачи;
- исполнители задачи, а также Руководитель проекта в чат задачи добавляются автоматически;

Правильно сформулированные требования к интерфейсу обеспечивают удобство пользования системой. Они определяют, каким образом пользователь будет взаимодействовать с системой. Требования к интерфейсу определяют элементы управления и поля для ввода данных, которые должны быть расположены в определенном разделе системы. Также необходимо, чтобы интерфейс системы был адаптирован под различные устройства, на которых будет запускаться система. При разработке требований к интерфейсу необходимо опираться на ранее разработанные функциональные и пользовательские требования.

В качестве примера представлено описание требований к окну «Задача»: при нажатии на конкретную задачу проекта должно всплывать окно с выбранной задачей. Окно конкретной задачи должно содержать название и описание задачи, исполнителей задачи, всю документацию и сроки выполнения задачи, если они были указаны. Должна быть возможность прикрепить файл, изменить статус задачи и отображение чата задачи справа. Для просмотра чата на мобильном устройстве должна быть кнопка «Открыть чат», после нажатия на которую, должно всплывать окно с чатом задачи.

III. Диаграммы взаимодействия объектов системы

Прежде чем приступать к разработке интерфейса инфокоммуникационной системы, необходимо на основе сформированных требований спроектировать диаграммы.

Диаграмма вариантов использования [5] – диаграмма, описывающая, какой функционал разрабатываемой программной системы доступен каждой группе пользователей.

На рис. 1 представлена диаграмма вариантов использования для групп пользователей Исполнитель (к этой группе пользователей относятся Разработчик, Тестировщик, UI/UX-дизайнер, Работник отдела технической документации и представления ПО, Начальник отдела разработки, Начальник отдела тестирования, Начальник отдела UI/UX, Начальник отдела технической документации и представления ПО) и PM (Менеджер проекта).

На рис. 2 представлена диаграмма вариантов использования для групп пользователей Начальник (Начальник отдела разработки алгоритмического ПО) и Заместитель начальника (Заместитель начальника отдела разработки алгоритмического ПО).

Интерфейс ИКС состоит из нескольких разделов, поэтому для корректного понимания переходов между этими разделами необходимо спроектировать диаграмму диалогов, отражающую взаимодействие пользователя с системой. На рис. 3 наглядно показаны способы перехода между разными разделами и окнами системы.

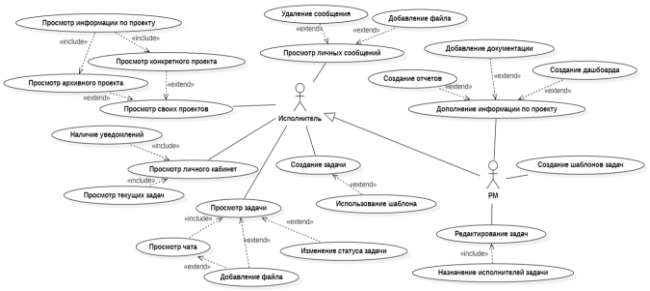


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования для пользователей с ролью PM и Исполнителя

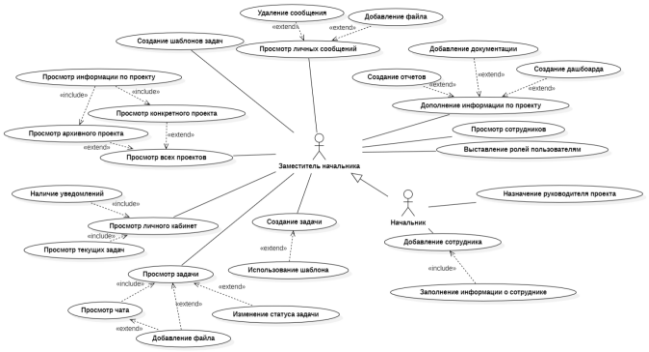


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования для пользователей с ролью Начальник и Заместитель начальника

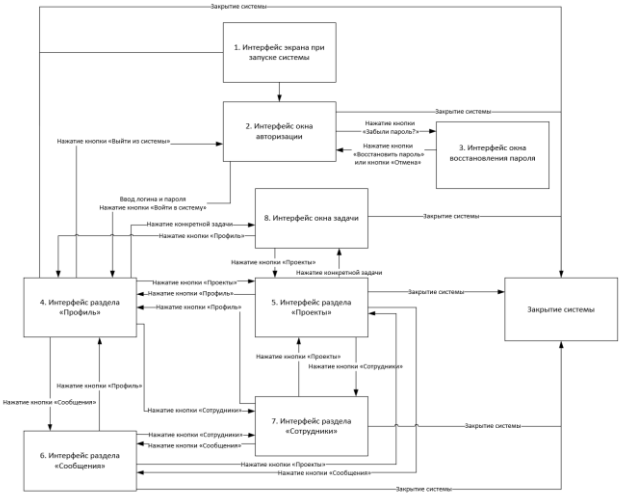


Рис. 3. Диаграмма диалогов

IV. Разработка интерфейса

Для разработки интерфейса была выбрана программа Figma, так как в ней можно не только создавать и редактировать макеты и прототипы, но и сделать визуализацию работы этих прототипов.

Сначала необходимо спроектировать низко детализированные прототипы (LF-прототипы) для понимания расположения графических элементов каждого раздела и окна. На рис. 4 и 5 представлены LF-прототипы профиля пользователя и окна «Задача».

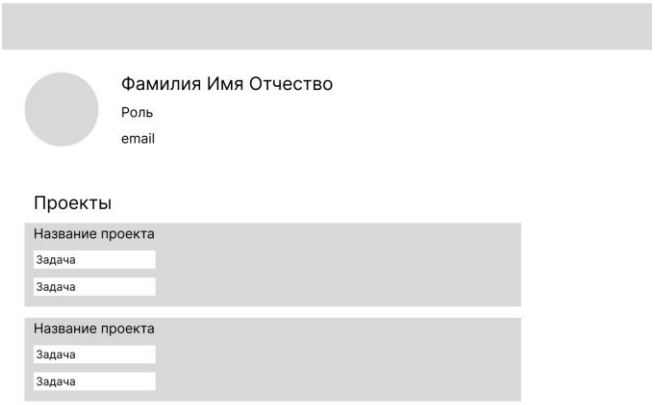


Рис. 4. LF-прототип раздела «Профиль»

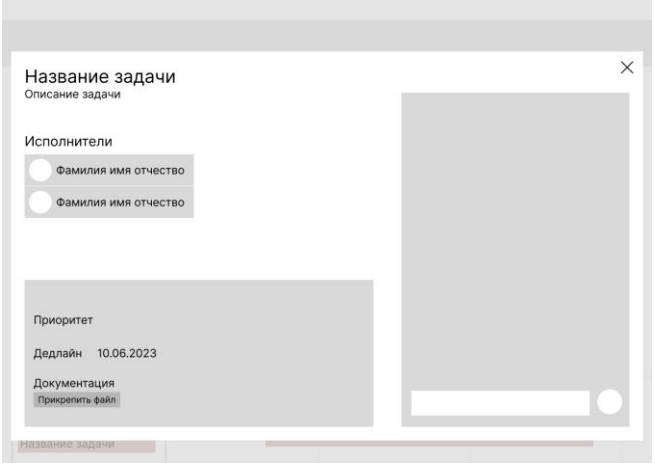


Рис. 5. LF-прототип окна «Задача»

На основе LF-прототипов были разработаны высоко детализированные прототипы (HF-прототипы) интерфейса ИКС. Для наполнения данных прототипов информацией были использованы следующие плагины:

- TinyFaces – плагин, генерирующий фотографии с помощью искусственного интеллекта;
- Fake Data Generator – плагин, генерирующий различную информацию, включая адреса электронной почты и ФИО;
- Tabler Icons – плагин, предоставляющий векторные иконки.

На рис. 6 и 7 представлены HF-прототипы профиля пользователя и окна «Задача».

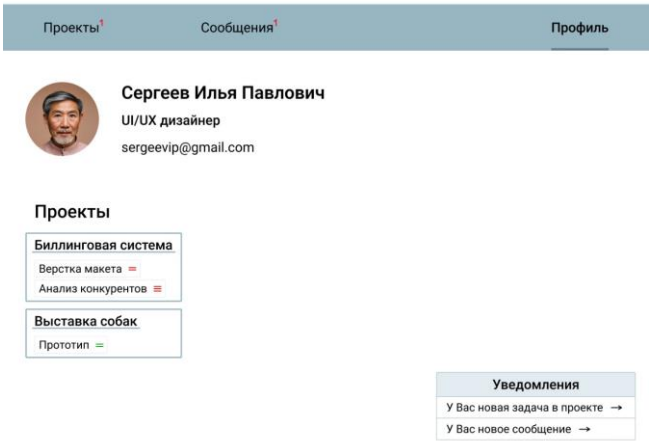


Рис. 6. HF-прототип раздела «Профиль»

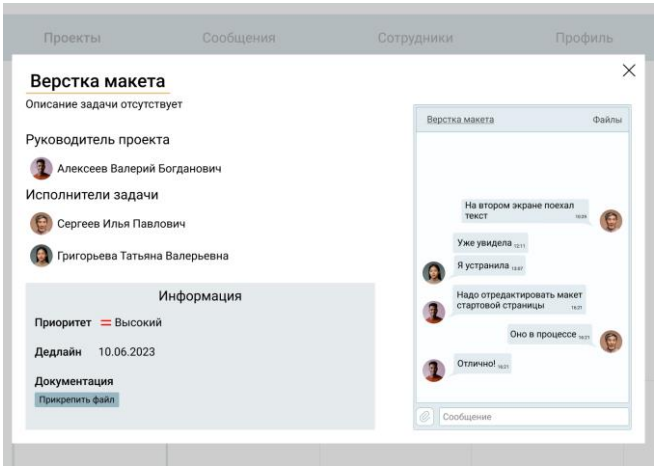


Рис. 7. HF-прототип окна «Задача»

Так как интерфейс должен быть адаптированным не только под экраны с большим разрешением, но также и под мобильные устройства, ниже, на рис. 8, представлены HF-прототипы соответствующих разделов: профиль пользователя и окно задачи.

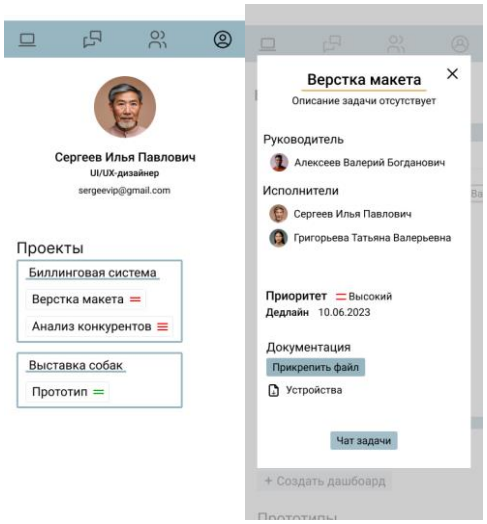


Рис. 8. HF-прототипы раздела «Профиль» и окна «Задача»

Так как экран мобильного устройства не может вместить в себя все, что может разместиться на экране ноутбука или персонального компьютера, было необходимо реализовать чат задачи, представленный на рис. 9, в отдельном окне. При нажатии на кнопку «Чат задачи» пользователю открывается чат. По нажатию на иконку, находящуюся справа от названия чата доступны все приложенные к чату документы. Чтобы выйти из чата необходимо нажать на кнопку «Назад», находящуюся слева от названия чата, таким образом, откроется окно задачи.

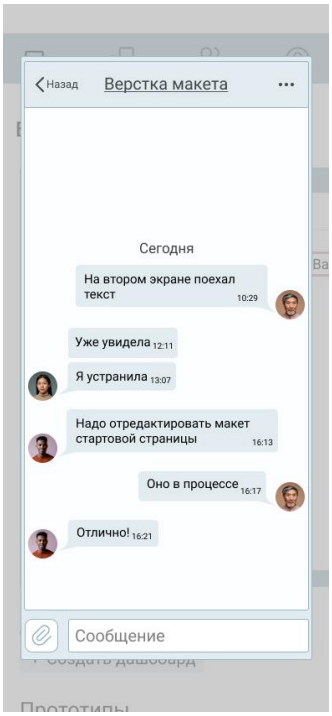


Рис. 9. HF-прототип окна чата задачи

V. Заключение

В результате работы был разработан интерфейс ИКС предприятия, адаптированный под экраны с большим разрешением, такие как ПК и ноутбуки, так и под мобильные устройства, имеющие маленькое разрешение экрана. При внедрении такого интерфейса ИКС у сотрудников не должно возникать вопросов по поводу использования данной системы за счет того, что разработанный интерфейс является простым, доступным и интуитивно понятным. В разработке ПО проектирование интерфейсов играет важную роль, так как намного проще изменять расположение объектов без редактирования кода и визуально представлять картину будущего продукта благодаря созданным прототипам, на которые в будущем разработчики будут опираться. Необходимость разработки прототипов обусловлена также тем, что при работе с заказчиками важно понимать их требования к продукту и корректно подойти к этапу проектирования, который включает в себя анализ похожих продуктов, разработку требований и различных диаграмм, на основе которого строится дальнейшая разработка ПО. Разработанный прототип интерфейса ИКС может быть использован в качестве иллюстративных материалов для инвесторов, а также в качестве минимально жизнеспособного продукта для заказчиков.

Благодарность

Автор выражает признательность ассистенту кафедры АПУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Лившиц Марине Владимировне за оказанную помощь при написании настоящей статьи.

Выражаю благодарность своему научному руководителю Шестопалову Михаилу Юрьевичу, доктору технических наук, за ценные советы при планировании исследования и рекомендации по оформлению статьи.

Список литературы

[1] Коберн А. Современные методы описания функциональных требований к системам. М.: Изд-во “Лори”, 2002. 263 с.

[2] Инфокоммуникационные системы и технологии: проблемы и перспективы / С.Л. Бедрина, В.М. Белов, О.Б. Богданова и др. СПб: Изд-во Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. 592 с.

[3] Сафонова А.А., Куксачева О.Н. Информационные системы управления проектами // Формула менеджмента. 2020, вып №1. С. 6.

[4] Классификация информационных систем предприятия [Электронный ресурс]. URL: https://fossdoc.com/ru/klassifikacija-informacionnyh-sistem (дата обращения 7.04.2023).

[5] Habr [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/566218/ (дата обращения 15.04.2023).

Основы автоматизированных технических систем управления

К. А. Сулейманова
Факультет компьютерных технологий и информатики
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
miss.kris06@yandex.ru

***Аннотация*. В данной статье мы рассмотрим основы, которые необходимо знать об автоматизированных технических системах управления. Это повысит эффективность и надежность в применяемых областях при разумном и результативном использовании. В данном исследовании обозначены существующие проблемы и представлены возможные перспективы развития и сделаны выводы о целесообразности применения современных технологий для повышения эффективности автоматизации технологических процессов.**

Ключевые слова: автоматизация, техническая система, преимущества и недостатки, управление

Прежде чем углубиться в тему, нам сначала нужно разобраться в основах автоматизированных технических систем управления.

Технология автоматизации – это перекрестная дисциплина, которая использует знания и научные методы из области механики, электротехники, производственного проектирования, конструирования и многих других технических наук.

Для реализации современных автоматических процессов необходимы три компонента:

1. датчики для определения состояний системы;
2. механизм для вывода команд управления;
3. контроллер для выполнения программы и принятия решений.

Системы автоматического управления активно развиваются и диверсифицируются. В проведенном исследовании рассматривались принцип регулирования автоматизированных технических систем управления, их преимущества и недостатки, и основные области их применения. Исследование было направлено на следующие аспекты:

- моделирование процесса;
- анализ чувствительности процесса к помехам/управляющим агентам-качеству каналов разделения продуктов;
- идентификация динамических моделей, связанных с каналами ввода-вывода;
- проектирование динамического симулятора и настройка контроллеров;
- проектирование системы прямого управления;
- разработка оптимального алгоритма управления и структуры системы автоматического управления;
- валидация путем моделирования предложенной структуры управления.

В основном автоматизированное управление означает, что программное обеспечение или конкретное приложение выполняет необходимый процесс управления без необходимости вмешательства человека или ручного контроля при производстве товаров и услуг.

Средствами автоматизации являются технологии, которые позволяют производить товары или услуги без значительного вмешательства человека. Внедрение автоматизированных систем управления может привести к экономии времени, экономической эффективности и снижению использования рабочей силы.

Современные технологии включают в себя разнообразные направления, такие как информационные и робототехнические, компьютерная графика, средства хранения данных и сенсорная технология. Как следствие, эти инновации значительно повлияли на развитие автоматизированных систем.

Главной целью автоматизированных систем управления является повышение эффективности, безопасности и надежности, а также освобождение людей от необходимости находиться в опасных или неподготовленных местах, где требуется контроль и управление оборудованием.

Рассматривая тему систем технического управления автоматизацией, мы обращаем внимание, прежде всего, на их составные элементы.

Важными компонентами здесь являются силовые устройства, обучающие программы и компоненты системы управления в целом. От первого элемента зависит выполнение процесса и управление автоматизированной технической системой, второй лежит в основе руководства процессом, а третий – следует полученным указаниям [1].

Основными типами автоматизированных систем технического контроля являются системы управления с открытым и закрытым контуром.

От автоматизированной системы управления с разомкнутым контуром зависит воздействие, которое идет от контроллера. В то же время входная мощность контроллера не зависит от переменной процесса, тогда как в системах управления с замкнутым контуром она зависит от желаемой установки и фактического значения «выхода процесса».

В современной автоматизации систем технического управления часто используются системы управления с замкнутым контуром.

Далее рассмотрим принцип регулирования автоматизированных систем:

Петли используются в технических системах управления для автоматизации управления командами и управления поведением других устройств или систем. Степень регулирования варьируется от одного бытового отопительного прибора до обширной промышленной автоматизации.

Автоматизированные системы управления требуют три функциональных компонента: измерения, обнаружения ошибок и итогового контроля [2].

При использовании обратной связи в замкнутом контуре, контроллер проводит сравнение измеренного значения выходного сигнала процесса с «желаемым заданным значением». Это заданное значение может быть установлено либо произвольно, либо предопределенно. Разница между фактическим значением выхода и желаемой установкой называется ошибкой. Сигнал ошибки используется в качестве обратной связи для коррекции и изменения входных данных процесса с целью поддержания оптимального уровня выходного сигнала, исключая возможные сбои и помехи [7].

Управление с замкнутым контуром может быть схематично представлено ниже (рис. 1):

Рис. 1. Схема замкнутого контура

Для сравнения с эталонным значением выходные данные системы передаются обратно через «датчики». Сигнал погрешности, то есть расхождение между заданным значением и фактическим сигналом, впоследствии передается в специальное устройство – «контроллер», для изменения входных сигналов на контролируемый «процесс».

Основными областями применения автоматизированных технических систем управления являются:

1. Производство – включает в себя управление оборудованием и производственными процессами, меры контроля качества, погрузку, разгрузку и другие сопутствующие аспекты. Промышленная робототехника также используется в ряде производственных процессов.
2. Связь – управление системами электронной телефонной коммутации, такими как телефонные сети, спутники связи и автоматические сортировщики почты.
3. Транспорт – помимо автоматизированного управления транспортными средствами, в транспортных системах также используются системы бронирования авиабилетов, автопилоты для самолетов и локомотивов, система городского общественного транспорта.
4. Сфера услуг – предлагает приложения в сфере здравоохранения, финансовых услуг и розничной торговли.
5. Домашняя автоматизация – управление бытовой техникой и функциями в частных домах и квартирах.

В данном исследовании мы также рассмотрим преимущества и недостатки автоматизированных технических систем управления.

Преимущества автоматизированных технических систем управления:

1. более высокие темпы производства и повышенная производительность;
2. эффективное использование материалов;
3. лучшее качество продукции;
4. сокращенные сроки изготовления на заводе;
5. повышение гибкости производства;
6. снижение прямых затрат на рабочую силу;
7. устранение человеческих ошибок;
8. освобождение от системы контроля: сотрудники могут применять другие правила;
9. повышение безопасности работников (снижение уровня травм на производстве).

Недостатки автоматизированных технических систем управления:

1. вытеснение сотрудников с рабочих мест, которые заняты выполнением своих обязанностей на машине;
2. потребность больших первоначальных инвестиций из-за высоких затрат;
3. высокие затраты на разработку;
4. требование более высокого уровня технического обслуживания (по сравнению с машиной с ручным управлением).

Управление техническими системами может столкнуться с несколькими проблемами:

1. Комплексность: управление техническими системами может быть сложным из-за множества взаимосвязанных компонентов, процессов и переменных. Это может затруднить понимание и прогнозирование влияния изменений или решений на систему в целом.
2. Несоответствие требованиям: при управлении техническими системами может возникнуть проблема, когда имеющиеся ресурсы, процессы или решения не соответствуют требованиям или ожиданиям. Недостаток ресурсов, неправильное планирование или неприспособленность системы могут привести к низкой эффективности или даже полному отказу системы.
3. Недостаточные знания и навыки: управление техническими системами требует

подготовленности и опыта в области технической экспертизы. Недостаток компетентности или человеческого ресурса может привести к ошибкам в управлении, расстройствам или даже авариям.

4. Информационные проблемы: информация является ключевым элементом управления техническими системами. Однако, недостаток или некачественная информация может привести к ошибочным решениям или неэффективной обработке данных. Неправильная интерпретация или передача информации также может создать сбои в управлении.

5. Динамичность и неопределенность: внешние факторы, такие как изменения рыночных условий, потребностей клиентов или технологических требований, могут быть непредсказуемыми и изменчивыми. Управление такими системами требует гибкости и способности адаптироваться к изменениям.

6. Координация и коммуникация: управление техническими системами требует взаимодействия между различными участниками и стейкхолдерами. Недостаточные навыки управления проектами, неполная коммуникация или недостаточная координация могут привести к задержкам, дублированию работы или конфликтам.

7. Недостаточная эффективность системы управления: возможно, система работает медленно или не обеспечивает желаемых результатов

8. Отсутствие надежности: система может быть нестабильной или часто выходить из строя.

9. Ограниченные возможности: система может не предоставлять необходимых функций или быть несовместимой с другими системами.

10. Проблемы с безопасностью: возможны уязвимости, связанные с защитой данных или нежелательным доступом к системе.

11. Нестабильность системы, особенно в случаях, когда управление осуществляется с использованием обратной связи. В управлении с обратной связью, система использует информацию о своем текущем состоянии и результате управления для корректировки своих действий. Однако, если обратная связь не настроена правильно или недостаточно эффективна, это может привести к нестабильности системы.

Одна из известных причин нестабильности - недостаточная фазовая задержка в обратной связи. Если информация о состоянии системы поступает слишком медленно или слишком быстро, это может вызывать колебания и нестабильность в управлении.

Это лишь некоторые из проблем, с которыми может столкнуться управление техническими системами. Каждая система уникальна и может иметь свои собственные специфические проблемы, которые требуют индивидуального анализа и решения.

Таким образом, использование автоматизированного управления обусловлено главным образом увеличением производительности и снижением производственных затрат. Автоматизированные технические системы управления, в конечном счете, могут, скорее всего, заменить человечество, чем служить ему. Если они будут использоваться разумно и эффективно, то также могут открыть значительные возможности для будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Автоматизация производства [Электронный ресурс]. / URL: https:// www.expocentr.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/ (дата обращения: 15.09.2023)

[2] Автоматизация производства: системы, их назначение и разновидности [Электронный ресурс]. / URL: https:// https://krasnodar.1cbit.ru/blog/avtomatizatsiya-proizvodstva-sistemy-i-ikh-naznachenie-i-raznovidnosti/(дата обращения: 15.09.2023)

[3] Гусев А.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. Текст: электронный / А.Н. Гусев, С.А. Ишков; М-во образования Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева. Самара, 2001.

[4] Иванова Г.В. Автоматизация технологических процессов основных химических производств: Методическое пособие. Часть 1. СПб.: СПбГТИ(ТУ). 2003.

[5] Корытин А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и промышленных установок. 2-е изд., 1988, 432 с.

[6] Крымский В.Г., Жалбеков И.М., Имильбаев Р.Р., Юнусов А.Р. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2013. № 2. С. 70-79.

[7] Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Интеграция искусственного интеллекта в автоматизированные системы управления и проектирования технологических процессов // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. № 1. С. 127-132.

[8] Тарасов В.Б., Святкина М.Н. Интеллектуальные SCADA-системы: истоки и перспективы // Машиностроение и компьютерные технологии, 2011. № 13. С. 35.

[9] Турицын Ю.А., Баранникова И.В., Пасечник И.А. Обзор современных АСУТП и АСДУ на промышленных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2009. № 12. С. 355-362.

Проектирование системы поддержки принятия решения в управлении IT-проектами на основе ключевых показателей эффективности

Е. А. Наумова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
nenaumova2007@gmail.com

***Аннотация*. Цель работы: проектирование системы поддержки принятия решения на основе ключевых показателей эффективности. В процессе работы было исследовано управление ресурсами на проектах, выделен ключевой ресурс – кадровые ресурсы, также были исследованы ключевые показатели эффективности и выбраны те из них, которые могут быть использованы в принятии решении относительно кадровых ресурсов. Были изучены необходимые параметры для выбранных ключевых показателей эффективности и разработаны методы их обработки, составлены требования к системе, разработаны прототипы экранных форм для проектируемой системы.**

Ключевые слова: проектирование системы, КПЭ, кадровые ресурсы

I. Введение

Управление проектом – это приложение знаний, навыков, инструментов и методам к работам проекта для удовлетворения требований, предъявляемых проекту [1]. Именно управление проектами позволяет выполнять проекты результативно и эффективно.

Хорошее управление проектом:

- помогает достигать бизнес-целей проекта;
- повышает вероятность успеха;
- позволяет своевременно реагировать на проблемы и вопросы, возникающие в ходе проекта;
- выявлять и управлять ограничениями на проектах.

Управление ресурсами проекта включает в себя следующие процессы:

- планирование управления ресурсами – процесс принятия решений относительно того, как будут производиться процессы по управлению ресурсами;
- оценку ресурсов – процесс аналитики состава необходимых для проекта ресурсов;
- приобретение ресурсов – процесс привлечения ресурсов, необходимых для выполнения работ;
- контроль ресурсов – процесс, направленный на отслеживание использования ресурсов и корректировку в случае необходимости.

Основной ресурс в сфере информационных технологий – сотрудники, на них приходится до 45 % [2] затрат в организациях. Поэтому в данной работе будет рассмотрено управление именно кадровыми ресурсами.

Управление кадровыми ресурсами состоит из следующих процессов:

- оценка эффективности работы персонала;
- наём и обучение для реализации тактических планов;
- удержание персонала.

Одна из самых больших статьей расхода в сфере информационных технологий – затраты на персонал. В данном разделе были проанализированы затраты на оплату труда, наем и обучение сотрудников.

Управление кадровыми ресурсами не зависит от структуры организации. Поэтому в данной работе будет рассмотрено управление кадрами не только в проекте, но и в подразделениях, и в организации в целом.

Для более эффективного управления кадровыми ресурсами необходимо эффективно управлять затратами на данные категории. А значит нужно принимать решения в каждой конкретной ситуации, например, когда стоит начинать поиск новых сотрудников, необходимо ли обучение, какое обучение лучше подойдет. Кроме того, необходимо следить за тем, насколько эффективно организация или команда удерживает кадры.

Управление данными категориями позволит не только снизить расходы на кадровые ресурсы, но и уменьшить вероятность того, что проект останется без необходимых кадров.

II. Исследование ключевых показателей эффективвности

Ключевые показатели эффективности (КПЭ) – оценочная методика, направленная на формирование показателей того, как команда или организация решает поставленные перед ней задачи, и какие процессы происходят внутри нее.

В данном разделе рассмотрены виды ключевых показателей эффективности по Бернарду Марру [7].

Для проектирования данной системы были выбраны некоторые показатели эффективности.

ТАБЛИЦА I. ИЗБРАННЫЕ КПЭ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

№	Показатель	Описание
1	$P_{текучести\ кадров}$	Коэффициент текучести кадров $P_{текучести\ кадров} = N_{увол.сотрудников}/N_{сред.сотрудников} \times 100$ где $P_{текучести\ кадров}$ – коэффициент текучести кадров, $N_{увол.сотрудников}$ – количество уволившихся сотрудников за период, $N_{сред.сотрудников}$ – среднее количество сотрудников за период.
2	$P_{средний\ стаж}$	Средний стаж непрерывнойработы $P_{средний\ стаж} = (\sum_{i=1}^{k} S_i / N_{общее\ сотрудников}) \times 100$ где Si – стаж i-го сотрудника из общего объема – k, а $N_{общее\ сотрудников}$ – общее количество сотрудников. Средний стаж может рассчитываться как по команде в целом, так и по отдельной категории, например по роли в проекте (должности), поэтому кроме параметров из формулы может потребоваться параметр R_i – роль (должность) i- го сотрудника.
3	$P_{абсентеизма}$	Фактор абсентеизма Бредфорда $P_{абсентеизма} = T_{незапл.отсут.} \times F_{отсутствия}$ где $T_{незапл.отсут.}$ – количество дней незапланированного отсутствия, $F_{отсутствия}$ – общее количество фактов отсутствия на работе.
4	$P_{конкурент./спо}$ собн. плат	Коэффициент конкурентоспособности заработных плат
5	$P_{время\ набора}$	Время набора персонала $P_{время\ набора} = (\sum_{i=1}^{k} D_{iнайма} - D_{iнач.поиска})/k$ где Di найма – дата найма i-го сотрудника, $D_{i\ нач.поиска}$ – дата начала поиска сотрудника, за которым последовало начало работы i-го сотрудника, а k – количество рассматриваемыхсотрудников.
6	$P_{удовл.}$ персонала	Индекс удовлетворенности персонала $P_{удовл.персонала} = (N_{сумма\ баллов}/N_{кол-во\ вопросов}) \times 100$ где $P_{удовл.\ персонала}$ – индекс удовлетворенности персонала, $N_{сумма\ баллов}$ – общее кол-во баллов, $N_{кол-во\ вопросов}$ – количествовопросов. Целевой показатель у данного индекса отсутствует, анализ проводится по динамике индекса или его составляющих.
7	$P_{вовл.персонала}$	Уровень вовлеченностиперсонала Уровень вовлеченности персонала аналогичен индексу удовлетворенности персонала, но он отвечает на вопросы о том, насколько сотрудники вовлечены в процессы компании. Измерения проводятся аналогично.
8	$P_{лоял.персонала}$	Показатель лояльности персонала Показатель лояльности персонала рассказывает о том, насколько сотрудники лояльны к действиям компании, и показывает уровень одобрения. Как и предыдущие два показателя показатель лояльности персонала измеряется при помощи опросов. Измерения проводятся аналогично.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

A. *Бизнес-требования*

Цель системы: сокращение затрат на простои при поиске сотрудника, сокращение затрат на поиск сотрудников путем их удержания, сокращение затрат на наем новых сотрудников, повышение эффективности использования уже имеющихся кадровых ресурсов.

Возможности, предоставляемые системой:

- анализ внутренних процессов в кадрах;
- анализ текучести персонала;
- анализ возможных вариантов для обучения сотрудников;
- анализ необходимости начала поиска новых кадровых ресурсов;
- формирование советов и решений для пользователя на основе проведенного анализа.

B. *Источники данных*

На данный момент можно говорить о том, что все крупные компании используют системы кадрового учета, например 1С:ЗУП и другие.

При интеграции с данными системами мы можем получать следующие данные:

ТАБЛИЦА II. НЕОБХОДИМЫЕ ДАННЫЕ ИЗ СИСТЕМ КАДРОВОГО УЧЕТА

№	Параметр	Описание
1	$N_{увол.сотрудников}$	Количество уволившихсясотрудников за период T
2	$N_{сред.сотрудников}$	Среднее количество сотрудников за период T
3	$N_{общее\ сотрудников}$	Общее количество сотрудников
4	S_i	Стаж работы каждого из сотрудников
5	R_i	Должность каждого из сотрудников
6	$T_{незапл.отсут.}$	Количество дней незапланированного отсутствия
7	$F_{отсутствия}$	Общее количество фактов отсутствия на рабочем месте
8	$D_{i\ найма}$	Дата приема на работу каждого из сотрудников
9	$O_{\ сотрудника}$	Подразделение сотрудника
10	-	Почтовый адрес сотрудника

Для ключевых показателей эффективности «Индекс удовлетворенности персонала», «Уровень вовлеченности персонала», «Показатель лояльности персонала», «Окупаемость инвестиций в обучение» и «Оценка полного цикла обратной связи» необходима интеграция с системами тестирования и интерфейс создания теста.

C. *Сценарии использования*

Рис. 1. Сценарии использования

D. *Схема базы даннных*

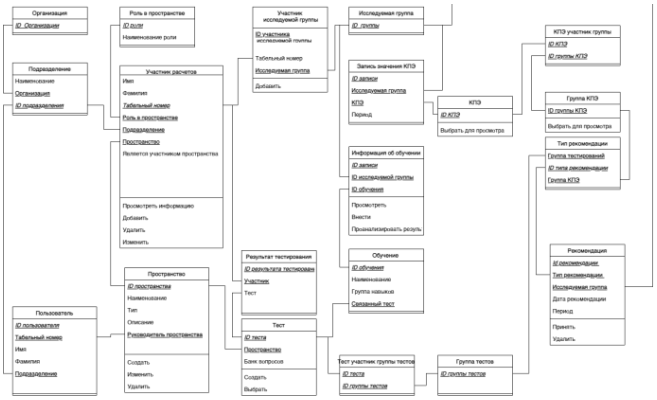


Рис. 2. Схема база данных

E. *Прототипы интерфейсов*

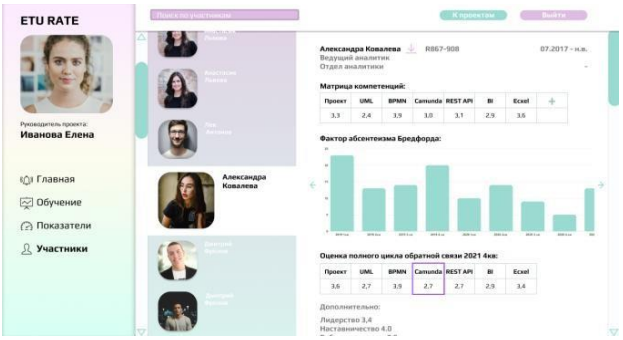


Рис. 3. Интерфейс просмотра информации об участниках

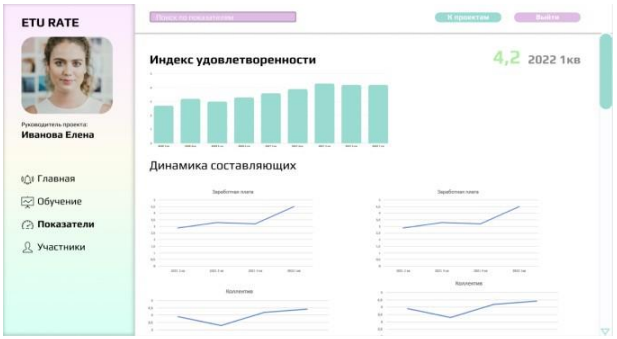


Рис. 4. Интерфейс просмотра информации о показателях

IV. Заключение

В процессе данной работы было исследовано управление кадровыми ресурсами в сфере информационных технологий и ключевые расходы в нем. Также были исследованы ключевые показатели эффективности и выбраны наиболее подходящие из них для помощи в принятии решений в управлении кадровыми ресурсами.

Были определены цели системы, разработаны требования и описаны основные сущности. Также были разработаны прототипы интерфейсов.

Данная система поможет руководителям находить ключевые параметры важные для сотрудников, что в свою очередь поможет сократить отток персонала и расходы на поиск новых сотрудников. Кроме того, данная система в перспективе может помочь крупным проектам или организациям вовремя уделить внимание поиску новых сотрудников, что снизит риски от ухода сотрудников.

К сожалению, данная система невозможна без интеграций, так как ручное внесение данных требует больших трудозатрат. Кроме того, в данной работе было рассмотрены только управление кадровыми ресурсами, данная система будет эффективнее, если в ней будут рассматриваться и другие виды ограничений на проектах.

Список литературы

[1] PMI Руководство к своду знаний по управлению проектами. Руководство PMBOK / PMI. 6-е издание. Олимп-Бизнес, 2019. 791 с.

[2] Картавый Э. Способы снижения расходов на ИТ-инфраструктуру // БИТ. Бизнес & Информационные технологии. 2020. №. 1. С. 28-30.

[3] HeadHunter [Электронный ресурс]. URL:https://spb.hh.ru/ (дата обращения: 10.05.2022).

[4] Инфляция в России [Электронный ресурс]. URL:https://totg.ru/agGgGz (дата обращения: 11.05.2022).

[5] HRTIME [Электронный ресурс]. URL: https://hrtime.ru/uslugi/podbor-programmistov-i-razrabotchikov/ (дата обращения: 20.05.2022).

[6] Обзоры зарплат [Электронный ресурс]. URL:https://zarplan.com/zarplata/MIDDLE%20%D0%A0%D0%90%D0%97%D0%A0%D0%90%D0%91%D0%9E%D0%A2%D0%A7%D0%98%D0%9A/%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1%D0%98%D0%AF/ (дата обращения: 11.05.2022).

[7] Marr B. Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know. Pearson UK, 2012.

[8] Савкин А. Плохие KPI: как избежать неправильного применения метрик // BSC Designer. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://bscdesigner.ru/bad-kpis.htm. (дата обращения: 12.05.2022).

[9] Хабр Карьера[Электронный ресурс].URL: https://career.habr.com/salaries (дата обращения: 10.05.2022)

[10] Алексеева О.Г. Выполнение дополнительного раздела ВКР бакалаврами технических направлений: учеб.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 16 с.

[11] Комоликова Е.В. Структура кадровых ресурсов организаций // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 39. С. 3366–3370. URL: http://e-koncept.ru/2017/971000.htm.

A/B тестирование и многорукие бандиты как способы сегментного тестирования продукта

А. М. Бутко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
abutko.dev@gmail.com

***Аннотация*. В статье представлены подходы к сегментному тестированию программного обеспечения с прямым взаимодействием с конечным пользователем программного продукта. Приведены предпосылки, алгоритм и способ оценки сегментированного тестирования, а также приведен способ улучшения результатов при помощи алгоритмов многоруких бандитов.**

Ключевые слова: тестирование гипотез; сплит-тестирование; A/B-тестирование; многорукие бандиты; сегментное тестирование, маркетинг; продуктовый менеджмент

I. Введение

Такие крупные американские IT-компании, как Google, Amazon, Netflix, акции которых входят в фондовый индекс крупнейших по капитализации корпораций S&P 500, выстроили бизнес-процессы так, чтобы проводить тысячи экспериментов в год и внедрять их результаты в программные продукты.

В 2016 году Netflix опубликовал статью со следующим содержанием: «Благодаря эмпирическому подходу к работе, мы точно знаем, что изменения в продукте продиктованы не вкусами и мнениями самых авторитетных сотрудников компании, а объективными данными. То есть наши зрители сами подсказывают нам, что им нравится». [2]

A/B тестирование еще в начале 20 века применял математик Вильям Госсе на производстве пива Guinness. Он использовал в производстве разные виды ячменя для того, чтобы определить какое сочетание понравится потребителю.

При помощи контролируемых экспериментов аналитики, маркетологи, продакт-менеджеры, дизайнеры и разработчики могут проверять различные творческие и технические гипотезы на жизнеспособность, и быстро и гибко внедрять самые удачные из них в продукт, основываясь на объективных данных.

Одним из таких подходов является сегментное тестирование продукта.

II. A/B тестирование

A/B тестирование (сплит-тестирование) – метод исследования, при котором тестируется эффективность двух вариантов (контрольный и тестовый) одного элемента (модель машинного обучения, внешнее оформление сайта, версии продукта и т. п.).

При A/B тестировании вариант, который дает более высокую конверсию, является выигрышным, т. е. этот вариант может помочь достигнуть более высоких результатов.

Далее будет приведен поэтапный подход к сплит-тестированию программного продукта.

A. Зачем проводить тестирование

A/B тест проводят для получения объективной информации о всевозможных способах улучшения текущей версии продукта. Но это не всегда связано с успешным тестированием и постоянным ростом. Например, A/B тесты могут помочь с тем, как не сделать проект хуже. Таким образом, тесты нужны и могут проводиться, когда:

1. Необходимо получить объективное мнение о качестве изменений.
2. Достаточно пользователей и данных.
3. Достаточно ресурсов для разработки и проведения теста.

B. Алгоритм тестирования

В данном подразделе рассматривается поэтапный алгоритм проведения сплит-тестирования.

1. *Определение цели.* На данном этапе необходимо четко сформулировать цель теста (например: повышение коэффициента конверсии, улучшение вовлеченности пользователей или увеличение дохода).
2. *Формулирование гипотезы*. Этот этап ставит важную для последующего тестирования задачу: определить конкретное тестируемое изменение или вариацию и выдвинуть гипотезу о его влиянии на желаемый показатель.
3. *Случайное распределение пользователей.* Случайным образом пользователи распределяются на две или более группы, обеспечивая равное распределение по вариантам. Такая рандомизация помогает свести к минимуму предвзятость и обеспечивает статистическую достоверность.
4. *Внедрение вариантов*. На данном этапе следует разработка и развертывание различных версий продукта. Необходимо гарантировать, что одновременно изменяется только одна переменная, что изолирует влияние конкретного тестируемого варианта.
5. *Сбор и анализ данных*. К этому этапу приступают для сбора релевантных данных, такие как взаимодействия пользователей, количество переходов или коэффициенты конверсии, для каждого варианта. Затем выполняется статистический анализ, чтобы определить, являются ли наблюдаемые различия статистически значимыми.

6. *Подведение итогов*. На основе анализа делаются выводы о производительности каждого варианта. Если один вариант значительно превосходит другие, его можно считать предпочтительным выбором.
7. *Реализация выигрышного варианта*. Применение информации, полученной в результате тестирования, для принятия обоснованных решений и реализации выигрышного варианта для достижения желаемой цели.

C. *Математическое обоснование A/B тестирования*

Допустим, что мы хотим протестировать цвет кнопки «купить» в интернет магазине. Мы полагаем, что пользователю достается один из двух вариантов (A или B). Нас будет интересовать, сколько всего пользователей дошли и нажали на кнопку в каждой из версий, то есть конверсия (r_A и r_B соответственно). После сбора достаточного количества данных, т. е. достаточного достижения v пользователей нас интересует, какой вариант обладает большей конверсией. Если было v пользователей, то в среднем мы полагаем, что – $v/2$ пользователей завершили в каждой из версий. Тогда:

$$P_A = \frac{N_A}{N_{conversion}} = \frac{N_A}{(N_A + N_B)} =$$

$$= \frac{\frac{v}{2} r_A}{\frac{v}{2} r_A + \frac{v}{2} r_B} = \frac{r_A}{r_A + r_B} =$$

$$= \frac{r_A}{r_A + r_B} * \frac{\frac{1}{r_A}}{\frac{1}{r_A}} = \frac{1}{1 + \frac{r_B}{r_A}}$$

Тогда

$1 < \frac{R_B}{R_A}$ – менее чем половина конверсии будет у варианта A

$\frac{R_B}{R_A} < 1$ – более половины конверсии будет у варианта A, то есть данное соотношение показательно для того, какой вариант предпочтительнее в контексте конверсии.

D. *Преимущества A/B тестирования*

К преимуществам A/B тестирования относятся:

1. принятие решений на основе данных;
2. оптимизация ключевых показателей;
3. снижение рисков;
4. улучшение пользовательского опыта;
5. инновации и итерации.

E. *Недостатки A/B тестирования*

К недостаткам A/B тестирования относятся:

1. размер выборки;
2. продолжительность тестирования;
3. снижение рисков;
4. наличие нескольких переменных;
5. сегментация;
6. интерпретация результатов.

Самым большим недостатком традиционного A/B теста является то, что одна версия (A) может значительно уступать другой (B), но неудачная версия будет показываться посетителям до завершения теста, что приведет к падению пользовательского и клиентского опыта (UX и CX соответственно). Для того чтобы избежать траты времени на проигрышную версию (или версии), можно применить алгоритмы многоруких бандитов.

III. Многорукие бандиты

Бандиты не являются полноценной альтернативой A/B-тестированию, но они могут эффективно применяться в определенных сферах, в отличие от A/B-тестов.

Тем не менее, многорукие бандиты позволяют ускорить выбор стратегий с наибольшим потенциальным приростом целевой метрики.

На рис. 1 представлено схематическое сравнение подходов тестирования для A/B и алгоритма многорукого бандита по времени. Если в случае с A/B тестированием опции распределены по времени и порождают проблему траты времени на проигрышную версию, то многорукий бандит с итерацией по времени отдает предпочтение выигрышной версии, пока она не останется единственным верным решением.

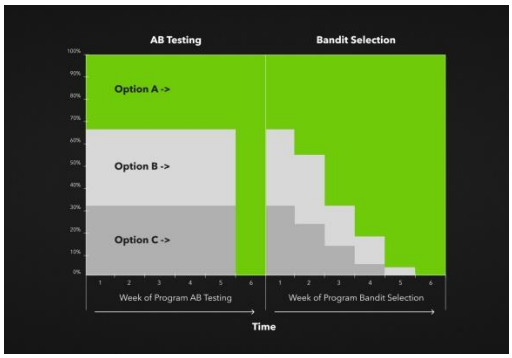


Рис. 1. Сравнение работы A/B и многорукого бандита

Многорукий бандит – это алгоритм принятия решений, суть которого заключается в обеспечении баланса между *исследованием* и *использованием (эксплуатацией)* какого-то из рассматриваемых вариантов решения с целью максимизации целевой метрики и минимизации убытков.

Награда (или *целевая метрика*) – значение метрики, полученного от использования того или иного варианта.

Эксплуатация (*exploitation*) – извлечение прибыли из текущих знаний.

Исследование (*exploration*) – это получение новых знаний, попытка ответить на такие вопросы, как: существует стратегия, которая может принести большую прибыль (награду)? А может быть, одна из стратегий внезапно начнет работать лучше других?

Такая дилемма является характерной для задач из области обучения с подкреплением (*reinforcement learning*), которое относится к разделу машинного обучения.

Многоруких бандитов можно разделить на два типа – в зависимости от того, какую задачу они призваны решить (сравнение приведено в табл. 1):

1. *Классические многорукие бандиты (MAB)*. К ним относятся алгоритмы для выбора одного самого эффективного варианта с максимальной потенциальной наградой. Это самый распространённый тип многоруких бандитов, к нему относятся широко известные классические реализации MAB: epsilon-greedy, UCB, Thompson sampling. Алгоритмы MAB не способны улавливать контекстные особенности среды, в которой работают, – они лишь перераспределяют трафик на варианты, где среднестатистически наблюдается наибольшее среднее значение целевой метрики.

2. *Контекстные бандиты (CMAB).* Это алгоритмы, направленные на оптимизацию награды в зависимости от контекста среды, в которой они работают. Суть их работы можно описать так: существует некоторая среда, в которой есть определённые закономерности, в которых перед CMAB стоит задача подобрать для субъектов среды такие варианты, которые бы максимизировали награду, исходя из этих закономерностей. Наиболее известные алгоритмы CMAB являются по своей сути комбинацией epsilon-greedy, UCB, Thompson sampling и линейной регрессии: linear epsilon-greedy, UCB, TS.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ MAB И CMAB

Признак	MAB	CMAB
Может оптимизировать только одну метрику	+	+
Не требует статистических предпосылок для принятия решений	+	+
В зависимости от контекста может выбрать несколько вариантов	-	+
Доступна оптимизация сложных зависимостей	-	+
Способен приспосабливаться к новым условиям среды	+/-	+

Применение многоруких бандитов позволяет:

- автоматически внедрять функционал при его успешности у пользователей;
- автоматически реагировать на изменения предпочтений пользователей;
- автоматически переключаться с «неработающего» варианта при сбое в инфраструктуре, без необходимости проведения экспериментов или процесса оценки результатов.

В табл. 2 приведем сравнение стандартного A/B тестирования и динамических (MAB) тестов.

ТАБЛИЦА II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ A/B И MAB

Стандартный A/B тест	Динамический (MAB) тест
Принимает единственное решение	Принимает решение «один-ко-Многим»
Статический: предполагает, что ничего не изменяется	Адаптивный: реагирует на изменение в процессе
Требует тщательного проектирования и тактики тестирования: подсчет размера образца, цели и условия	Требует тактики тестирования: цели и условия
Ручной мониторинг	Полностью автоматизированы
Использование производительности на всех вариантах	Фокусирование на использовании лидирующего варианта

Рассмотрим основные модели MAB:

A. *Эпсилон жадный (epsilon greedy)*

Данный жадный алгоритм основывается на выборе стратегии с максимальной средней наградой (средним значением метрики в процессе оптимизации). С определенной вероятностью, заданной заранее, выбирается случайная стратегия для исследования.

B. *Верхняя граница достоверности (UCB)*

В отличие от предыдущей модели основывается не на случайности, а на растущей со временем неопределенности у стратегий. Данный алгоритм задействует все стратегии случайным образом, после чего рассчитывается средняя награда каждой. Выбор стратегии происходит следующим образом:

1. каждую итерацию обновляются средние награды стратегий;
2. с течением времени (итераций), чем реже выбиралась та или иная стратегия, тем выше будет ее неопределенность;
3. окончательный выбор стратегии – максимальная сумма средней награды и неопределенности всех стратегий.

Таким образом, следующий алгоритм в математическом виде выглядит следующим образом:

$$A_t = argmax\,[Q_t(a) + c\sqrt{\frac{\ln(t)}{N_t(a)}}]$$

где $Q_t(a)$ – среднее значение награды стратегии a; t – общее количество наблюдений; $N_t(a)$ – количество раз выбора стратегии a; c – коэффициент «проталкивания» исследования (может принимать статические и динамические значения, его размер определяет направленность алгоритма на исследование.

C. *Выборка Томпсона*

Алгоритм основан на байесовском подходе, следовательно, будет задействовать априорное распре деление (предположения до учета экспериментальных данных) и апостериорное распределение (полученное после учета экспериментальных данных).

Так, каждый вариант перед запуском алгоритма имеет априорное распределение награды, которое по мере поступления данных становится апостериорным. Выборка Томпсона берет случайные значения из этих распределений, сравнивает их и выбирает вариант с максимальным значением.

D. *Контекстуальные бандиты*

Для данного алгоритма необходимо учитывать контекст, т. е. использовать модель, которая способна делать предсказания награды в зависимости от факторов. Одной из таких моделей является байесовская линейная регрессия. Так, каждый коэффициент перед фактором X имеет априорное распределение, что отсылает на предыдущий пункт доклада – выборку Томпсона.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведены способы сегментного тестирования и проверки гипотез программного продукта, приведены преимущества и недостатки A/B тестирования, и предложен вариант улучшения показателей подбора верного варианта проверки

гипотезы. Рассмотрен алгоритм A/B тестирования и основных методов тестирования при помощи многоруких бандитов.

Список литературы

[1] А/Б тестирование — практическое руководство: что такое, в чем ценность и как провести // UXJournal URL: https://ux-journal.ru/ (дата обращения: 27.09.2023).

[2] It’s All A/Bout Testing: The Netflix Experimentation Platform // Netflix Tech Blog URL: https://netflixtechblog.com/ (дата обращения: 27.09.2023).

[3] Контекст, награда, много рук. Многорукие бандиты как метод принятия решений // Habr URL: https://habr.com/ (дата обращения: 26.09.2023).

[4] Is Bayesian A/B Testing Immune to Peeking? Not Exactly // VARIANCE EXPLAINED URL: http://varianceexplained.org/ (дата обращения: 26.09.2023).

[5] White J.M. Bandit Algorithms for Website Optimization. 1 изд. O'Reilly Media, Inc, 2012. 85 с.

[6] Lattimore T., Szepesvári C. Bandit Algorithms. 1 изд. Cambridge University Press, 2020. 536 с.

Система регулирования многокомпонентной ректификационной колонной на базе MPC

А. Ю. Трясцын, О. А. Ремизова
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
tryastsyn.andrej@yandex.ru, remizova-oa@technolog.edu.ru

***Аннотация*. В работе рассмотрено построение системы автоматического регулирования на примере многокомпонентной колонны с использованием MPC технологий. Приведен анализ процесса как объекта автоматизации, выявлены основные параметры, влияющие на ход технологического процесса, и приведены основные параметры регулирования. Определено влияние регулирующих параметров на показатели технологического процесса.**

Ключевые слова: ректификационная установка, перекрёстные связи, система связанного регулирования, MPC

I. Введение

В качестве объекта управления в данной работе выбрана атмосферная колонна К-2. Атмосферная колонна К-2 многокомпонентной ректификации нефти (РК) относится к классу сложных многомерных и многосвязных объектов управления. Это наиболее ответственный и сложный технологический объект управления в установках первичной переработки нефти. Каждый продукт (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут) отбирается с отдельной тарелки в соответствии со своей температурой кипения при определенном давлении.

Многокомпонентную ректификационную колонну как объект управления характеризует нелинейность статических характеристик, значительная инерционность процессов, дрейф параметров объекта управления во времени, значительное количество взаимосвязанных параметров. Всё это требует построения математической модели сложной структуры и увеличивает сложность синтеза эффективных автоматических систем управления [1]. Информационную схему такого объекта регулирования представим на рис. 1.

В системах связного регулирования состояние объекта определяется несколькими регулируемыми величинами, а число регулирующих воздействий соответствует числу этих величин.

II. Основная часть

Для оценки влияния перекрестных связей в выбранной нами АСР произведено моделирование основных каналов регулирования, как двух независимых одноконтурных систем. Для этого в среде разработки MATLAB Simulink был выполнен подбор коэффициентов для ПИД-регуляторов по каждому основному каналу управления. Кроме того, было выявлено влияние перекрестных связей на основные. Для этого в среде MATLAB Simulink составим структуру системы управления атмосферной колонной К-2 с перекрестными связями. В качестве возмущающего воздействия на вход системы, как и в случае с одноконтурными САР, подано ступенчатое воздействие.

Для проведения сравнительного анализа различных методов автоматизации, рассмотрим 2 канала регулирования объектов. 1 канал регулирования – $F_{флегмы}$ – $L_{конденсатора}$; $F_{керосина}$ в стриппинг – $F_{керосина}$ после стриппинга. Регулирования данных параметров образуют между собой систему связного регулирования.

Перекрестные связи оказали влияние на устойчивость системы, обе величины не вышли на установившееся значение, что позволяет сделать вывод, что ПИД-регуляторы не справляются с регулированием многосвязной САР.

Рис. 1. Информационная схема объекта управления атмосферная колонна К-2

Рассмотрим метод управления САР с использованием интеллектуальных средств, таких как MPC. Прогнозирующее управление модели (MPC) является методом оптимального управления, в котором расчетные действия управления минимизируют функцию стоимости для ограниченной динамической системы по конечному, возвращению захваченного, горизонту.

На каждом временном шаге контроллер MPC получает или оценивает текущее состояние объекта. Это затем вычисляет последовательность действий управления, которая минимизирует стоимость по горизонту путем решения ограниченной задачи оптимизации, которая использует внутреннюю модель объекта управления и зависит от состояния существующей системы. Контроллер затем обращается к объекту только первое вычисленное действие управления, игнорируя следующие единицы. В следующем временном шаге повторения процесса. На рис. 2 изобразим структурную схему MPC-регулятора.

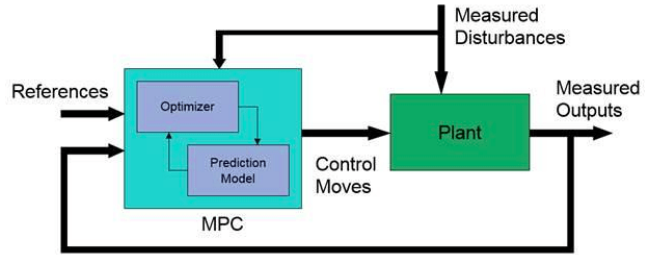


Рис. 2. Структурная схема MPC-регулятора

Когда функция стоимости квадратична, объект линеен и без ограничений, и горизонт стремится к бесконечности, MPC эквивалентен управлению линейно-квадратичного регулятора (LQR) или управлению линейно-квадратичным гауссовым (LQG), если фильтр Калмана оценивает состояние объекта от своих вводов и выводов.

На практике, несмотря на конечный горизонт, MPC часто наследовал много полезных характеристик традиционного оптимального управления, таких как способность естественно обработать объекты мультивхода – мультивыхода (MIMO), возможность контакта с задержками (возможно различной длительности в различных каналах), и встроенные свойства робастности против моделирования ошибок. Номинальная устойчивость может также быть гарантирована при помощи определенных терминальных ограничений. Другими дополнительными важными функциями MPC является его способность явным образом обработать ограничения и возможность использования информации о будущей ссылке и сигналах воздействия, когда доступно.

Решение ограниченного оптимального управления онлайн на каждом временном шаге может потребовать существенных вычислительных ресурсов. Однако в некоторых случаях, касающихся линейных ограниченных объектов, можно предварительно вычислить и сохранить закон о надзоре через целое пространство состояний, а не решать оптимизацию в режиме реального времени.

Среда разработки MATLAB Simulink позволяет осуществлять проектирование САР с использованием MPC-регулятора. Структурную схему такой САР представим на рис. 3.

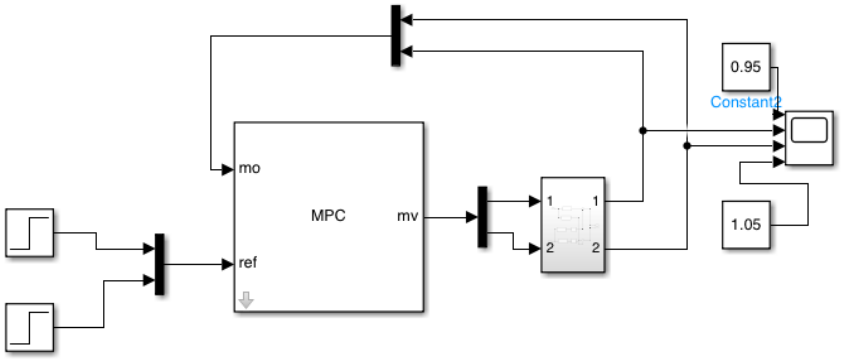


Рис. 3. Структурная схема САР с использованием MPC-регулятора

Среда разработки позволяет настроить MPC-регулятор под конкретный объект управления. Выбрать горизонт предсказания (Prediction horizon) и горизонт управления (Control horizon), а также время выборки (Sample time). Диалоговое окно настройки MPC – регулятора и результаты моделирования в среде разработки MATLAB Simulink приведены на рис. 4.

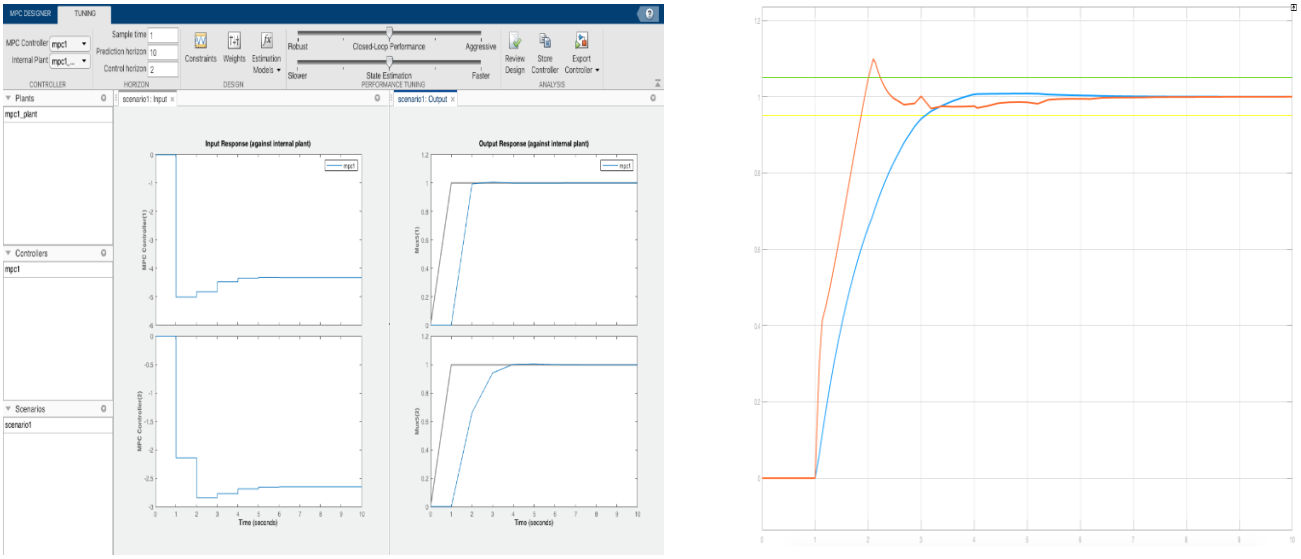


Рис. 4. Диалоговое окно настройки MPC – регулятора и результаты моделирования в среде разработки MATLAB Simulink

III. Выводы

Использование MPC-регулятора позволило устранить влияние перекрестных связей на основные каналы регулирование. Оба процесса вышли на заданные значения и соответствуют критериям качества регулирования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование таких регуляторов, как MPC – целесообразно в системах многосвязного регулирования. Использование принципа управления с прогнозирующей моделью для регулирования технологических параметров наравне с ПИД-регулятором – достаточно перспективное направление. Но необходимо при этом учитывать ряд ограничений, накладываемых на ПЛК при применении MPC-регуляторов, в частности, по количеству применяемых регуляторов.

Список литературы

1. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: Физматлит, 2012. 300 с.

Синтез одноконтурной системы регулирования на примере ректификационной установки

А. В. Коршикова, О. А. Ремизова
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
aleksabochkareva@mail.ru

***Аннотация*. Целью данной работы является обобщение исследований по изучению одноконтурных систем регулирования, так как именно эти системы являются одним из основных инструментов автоматизации промышленных производств. Одноконтурные системы используются на большинстве предприятий, в том числе, и химической промышленности.**

В задачи исследования легла разработка теоретической базы по темам: регулирование технологических объектов управления, автоматические системы управления, промышленные регуляторы и их синтез, и устройство; а также методические указания по следующим темам: идентификация объектов управления, синтез автоматической системы управления, синтез регуляторов, а также исследование возмущающих воздействий на объект АСР.

Ключевые слова: синтез систем регулирования, одноконтурная система регулирования, ПИД-регулирование

В работе под регулированием подразумевается процесс настройки системы управления под характеристики и поведение объекта управления [1–3]. В качестве примера объекта управления приведена ректификационная колонна по производству технического этилового спирта, в которой при помощи одноконтурной АСР осуществляется управление концентрацией дистиллята путём изменения расхода питающего потока флегмовой ёмкости. На рис. 1 представлена структурная схему объекта, состоящая из теплообменников 2–4, ректификационной установки 1 и флегмовой емкости 5. Конденсат на выходе из верхней части колонны собирается во флегмовой ёмкости, из которой отбирается два потока: поток дистиллята и флегм.

Применимо к выбранному контуру регулирования ректификационной колонны, схема отражает следующий процесс: под объектом управления на схеме подразумевается технологический процесс поддержания концентрации дистиллята. На выходе объекта установлен первичный преобразователь концентрации, который установлен в контуре регулирования, и в комплекте с регулятором осуществляет поддержание показателя эффективности на заданном значении.

Для синтеза системы регулирования необходимо определиться с методом идентификации объекта управления. Идентификация осуществляется различными методами, которые можно поделить на 2 большие группы. Это аналитические методы, в данной работе были рассмотрены методы с использованием дифференциальных уравнений и при помощи z-преобразований, а также экспериментальные методы, основные на аппроксимации кривых разгона реальных объектов. В числе экспериментальных методов были рассмотрены: метод получения приближенных аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений с малой нелинейностью А. Н. Крылова; метод В. Стрейца, метод площадей.

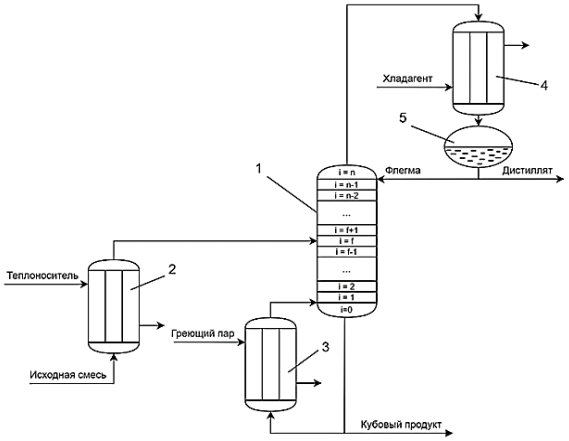


Рис. 1. Схема ректификационной колоны

Аналитические методы в данной работе были рассмотрены с использованием метода безразмерных переменных, который сводился к получению передаточной функции на основе параметров колонны, а также метода z-преобразований в том случае если параметры колоны не известны и система управления цифрового типа.

Экспериментальные методы в свою очередь представлены в следующем виде. Метод Крылова сводится к получению корней диф. уравнения колебательного звена на основе графических данных. В процессе реализации этапа идентификации объекта управления, в первую очередь, была получена передаточная функция аналитическим способом, на основе которой в MATLAB Simulink была построена кривая разгона модели объекта и аппроксимирована экспериментальным методом Стрейца. С помощью этого метода графически-аналитическим способом можем найти значения T и τ с использованием табличных данных. А для метода площадей можно использовать номограммамы для определения коэффициентов передаточной функции, представленные на рис. 2.

На основе полученных в ходе идентификации динамических характеристик объекта, а именно передаточной функции и времени запаздывания была построена математически модель АСР В ПО MATLAB Simulink. Был выведен алгоритм автоматизированного проектирования моделей АСР, на основе встроенных библиотек ПО. В их числе библиотеки: Continious, Math, Nonlinear, Sources, Signals & Systems.

Следующим шагом алгоритма создания АСР является синтез автоматических регуляторов. Настойка их параметров осуществляется либо в так называемом

ручном режиме, либо в автоматическом при помощи ПО. В качестве традиционных методов были рассмотрены методы: метод Циглера–Никольса, метод незатухающих колебаний, метод расширенных частотных характеристик, а автоматический синтез регулятора был реализован при помощи программных возможностей матлаба. В табл. 1 и 2 можно увидеть результаты настройки П- ПИ- и ПИД-регуляторов представленными методами.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Тип регулятора	**Параметры настроек регулятора**		
	C_1	**C_0**	**C_2**
Метод определения параметров настройки регулятора по переходным характеристикам Циглера и Никольса			
П-регулятор	2.632	-	-
ПИ-регулятор	2.368	29.139	-
ПИД-регулятор	3.158	6.555	3.642
Метод незатухающих колебаний			
П-регулятор	2.934	-	-
ПИ-регулятор	2.641	0.049	-
ПИД-регулятор	3.521	0.11	28.202
Метод расширенных частотных характеристик			
П-регулятор	2.827	-	-
ПИ-регулятор	1.77	0.017	-
ПИД-регулятор	1.872	0.029	4.97

ТАБЛИЦА II. РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ПОИСКА ПО MATLAB SIMULINK

Закон регулирования	**Коэффициенты регуляторов**			**Характеристики качества регулирования**		
	P	**I**	**D**	**Статическая ошибка**	**Быстродействие t, с**	**Перерегулирование σ, %**
П-	3.03	-	-	0.3	44.41	38.3
ПИ-	1.79	0.03	-	-	44.91	5.74
ПИД-	1.70	0.03	6.98	-	60.69	5.82

Метод Циглера–Никольса в данной работе был основан на нахождении коэффициентов a и L при проведении касательной к кривой разгона. Далее коэффициенты находились из табл. 3.

ТАБЛИЦА III. ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ ЦИГЛЕРА И НИКОЛЬСА

Регулятор	**C_1**	**C_0**	**C_2**
П-	1/a	-	-
ПИ-	0.9/a	3L/K	-
ПИД-	1.2/a	0.9L/K	0.5L/k

Метод незатухающих колебаний сводился к нахождению критической частоты колебаний $\omega_{кр}$, а далее по формульным зависимостям (1–7)

$$C_1^{кр} = \frac{\sqrt{1 + (\omega_{кр} \cdot T)^2}}{K} \quad (1)$$

$$C1_{П} = 0.5 \cdot C_1^{кр} \quad (2)$$

$$C1_{ПИ} = 0.45 \cdot C_1^{кр} \quad (3)$$

$$C0_{ПИ} = 0.086 \cdot C_1^{кр} \cdot \omega_{кр} \quad (4)$$

$$C1_{ПИД} = 0.6 \cdot C_1^{кр} \quad (5)$$

$$C0_{ПИД} = 0.192 \cdot C_1^{кр} \cdot \omega_{кр} \quad (6)$$

$$C2_{ПИД} = \frac{0.471 \cdot C_1^{кр}}{\omega_{кр}} \quad (7)$$

Последним методом был рассмотрен метод РХЧ, который сводился к формулам расчёта в общем случае параметров ПИД-регулятора (8–10). Была построена зависимость коэффициентов C0 и C1 от частоты колебаний ω. Нахождение коэффициентов регулятора было сделано для рабочей зоны в точке 2 как это показано на рис. 2.

$$C1 = \frac{-[A(m,\omega)]^{-1} \cdot \sqrt{1+m^2} \cdot \cos(y)}{1 - T_{div} \cdot m \cdot 2 \cdot \omega} \quad (8)$$

$$C0 = [A(m,\omega)]^{-1} \cdot \omega \cdot \sqrt{1+m^2} \cdot [m \cdot \cos(y) - \sin(y)] - T_{div} \cdot (1+m^2) \cdot C1 \cdot \omega^2 \quad (9)$$

$$C2 = T_{div} \cdot C1 \quad (10)$$

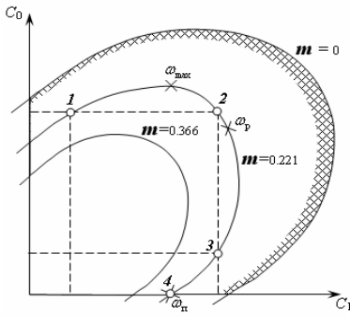


Рис. 2. Зависимость C1 от C0

В MATLAB Simulink имеется возможность сравнить качество настройки П- ПИ- и ПИД-регуляторов. На основе результатов сравнения комплексов настроек можно определить наиболее подходящий метод настоек регулятора конкретно для нашей системы. Для объекта управления наилучшим методом стал метод незатухающих колебаний. Так же в MATLAB Simulink имеется возможность подобрать конкретный тип регулятора для нашего объекта. В таком случае настройки параметров регулятора рассчитываются автоматически. В результате лучшим является ПИ-регулятор.

Следующим этапом синтеза АСР является проверка соответствия полученного регулятора требованиям к качеству регулирования АСР. С графика переходной характеристики ПИ-регулятора имеем возможность снять все необходимые данные, в числе которых: время регулирования, статическая ошибка, перерегулирование и так далее.

Последним этапом синтеза АСР является ее исследование на возмущающие воздействия для проверки работоспособности системы. Для этого в MATLAB Simulink на модель АСР подаются возмущающие воздействия. На вход, на выход, и по заданию. По результатам исследования ПИ-регулятор обеспечивает полную работоспособность одноконтурной АСР.

Результатом проведённого исследования является законченный практикум для проведения лабораторных работ по исследованию одноконтурных АСР. В разработанный лабораторный практикум включены: теоретические сведения, методические указания, а также практические задания для выполнения студентами.

В результате выполнения работы:

- Создан универсальный практикум, который может быть использован при создании лабораторного комплекса.
- Подготовлена теоретическая база, включающая в себя необходимый объем информации.
- Проанализирован комплекс методов, вошедших в лабораторный практикум, в их числе: аналитические и экспериментальные методы идентификации объекта управления; методы поиска ОНПР.
- Был разработан алгоритм проверки работоспособности автоматической системы управления, включающий в себя: проверку системы на соответствие требованиям к качеству регулирования; проверку устойчивости системы к возмущающим воздействиям.
- Основанным средством автоматизации проектирования в работе стал MATLAB Simulink, имеющий широкие возможности.

Список литературы

[1] Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. Изд. 3-е, перераб. М.: «Химия», 1974. 440 с.

[2] Галенков А. А. Анализ технологического процесса ректификации как объекта управления // Современные наукоемкие технологии, № 6, 2007. С. 43-44.

[3] Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: МЭИ, 2004. 400 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка методики синтеза нечеткой модели управления и диагностики процесса транспорта газа
Д. М. Лосева, М. Ю. Шестопалов (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 3

Обобщенная структура отказоустойчивого управления технологическими системами транспорта газа
Д. М. Лосева (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 8

Исследование механизмов проникновения вредоносного программного обеспечения в АСУ ТП промышленных предприятий
С. А. Багусевич, Е. В. Коровкина, В. Л. Литвинов (*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича*) 14

Автоматизация измерения диаметров и толщин трубки из кварцевого стекла оптическими методами
А. О. Аль Гурайбави (*Санкт-Петербургский государственный технологический институт* (*технический университет*) 16

Анализ технологий в системах хранения данных при разработке собственного решения
А. В. Ерошкин (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*), М. А. Потапова (*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*), А. Е. Лончина (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 20

Локализация местоположения нарушения целостности магистрального нефтепровода
Ю. С. Михайлова (*Санкт-Петербургский государственный технологический институт* (*технический университет*) 24

Математическая модель процесса сжигания черного щелока в топке содорегенерационного котла
М. А. Новикова (*Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД*) 28

Исследование управляемых процессов биоочистки сточных вод с использованием модели ASM1
А. В. Андреев (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 32

Разработка адаптивного интерфейса инфокоммуникационной системы предприятия
К. А. Четверикова (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 36

Основы автоматизированных технических систем управления
К. А. Сулейманова (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 41

Проектирование системы поддержки принятия решения в управлении IT-проектами на основе ключевых показателей эффективности
Е. А. Наумова (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 44

A/B тестирование и многорукие бандиты как способы сегментного тестирования продукта
А. М. Бутко (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) 47

Система регулирования многокомпонентной ректификационной колонной на базе MPC
А. Ю. Трясцын, О. А. Ремизова (*Санкт-Петербургский государственный технологический институт* (*технический университет*) 51

Синтез одноконтурной системы регулирования на примере ректификационной установки
А. В. Коршикова, О. А. Ремизова (*Санкт-Петербургский государственный технологический институт* (*технический университет*) 54

WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU

Кафедра автоматики и процессов управления
197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, лат. Ф, корп.1, пом. 1204
+7 812 234-37-98 Shestopalov_08@mail.ru