

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания к практическим занятиям, лабораторным
работам и самостоятельной работе
для студентов магистратуры и аспирантов

Авторы и составители: Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Шутенков А.В.

Математическое и компьютерное моделирование объектов и систем управления: Методические указания для практических занятий, лабораторных работ и самостоятельной работы студентов по дисциплинам «Математическое моделирование объектов и систем управления», «Моделирование технических объектов управления», «Компьютерное моделирование систем» и «Компьютерное моделирование объектов и систем управления».

Томск, 2018. – 70 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Разработка учебно-иллюстративных модулей..	4
Лабораторная работа № 2. Исследование источника вторичного электропитания	13
Лабораторная работа № 3. Формирование многоуровневой компьютерной модели для исследования системы управления «Бетономешалка на электроприводе»	21
Лабораторная работа № 4. Разработка и отладка сценариев управления на компьютерных моделях химико-технологических систем	32
Лабораторная работа № 5. Решения задачи проектирования теплообменного аппарата	40
Лабораторная работа № 6. Определение точки росы газа путем проведения многовариантного анализа в многоуровневой компьютерной модели.....	45
Лабораторная работа № 7. Формирование многоуровневой компьютерной цепи минимизации расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа	53
Лабораторная работа № 8. Построение компьютерных моделей виртуальных приборов	60
Список использованной литературы	69

Лабораторная работа 1. Разработка учебно-иллюстративных модулей

1. Цель работы

Исследование и проверка закона Ома на виртуальной экспериментальной установке, содержащей ER -цепь с возможностями варьирования параметров резисторов

2. Указание к выполнению работы

Основной задачей учебного эксперимента является демонстрация некоторого физического эффекта, явления, а также иллюстрация принципов, законов и теорем изучаемых дисциплин. Для его выполнения в системе ВИП реализована возможность разработки учебно-иллюстративных модулей (УИМ). Они представляют собой многоуровневые компьютерные модели, предназначенные для пояснения и визуализации основных положений и законов технических дисциплин. В этом случае на ее объектном уровне располагается компьютерная модель технического объекта, демонстрирующая изучаемый физический закон или эффект. Логический уровень содержит модель алгоритма функционирования УИМа. На визуальном уровне располагаются средства визуализации результатов выполняемых в УИМе вычислительных экспериментов и данные их математической обработки. Также на этом уровне представлены компоненты интерактивного управления значениями параметров модели исследуемого объекта.

Для целей варьирования параметров компонентов объектного уровня каждому его компоненту может быть поставлен в соответствие компонент «Атрибут», располагающийся на логическом уровне. Для установки компонента «Атрибут» любого компонента объектного или визуального уровня необходимо щёлкнуть правой кнопкой мыши по изображению данного компонента и в выпавшем меню выбрать подменю «Связь с атрибутом», а в этом подменю выбрать имя атрибута, который подлежит изменению. В качестве дополнительной литературы можно воспользоваться [1, 2].

3. Содержание работы

3.1 Сборка виртуального стенда для проведения эксперимента

3.2 Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3 Проведение измерений тока и напряжения в ER -схеме

3.4 Варьирование параметрами функционала резистора

3.5 Проверка выполнимости закона Ома

4. Порядок проведения работы

В данной работе необходимо на объектном уровне выбрать резистор R1, представленный на рис. 1.1, а, и в подменю «Связь с атрибутом» необходимо выбрать пункт «Сопротивление, Ом». В данном случае на логическом уровне появится компонент «Атрибут», приведенный на рис. 1.1, б. Он предназначен для изменения параметра «Сопротивление» компонента «Резистор», представленного на рис. 1.1, а и отображаемого на объектном уровне многоуровневой КМ УИМа.

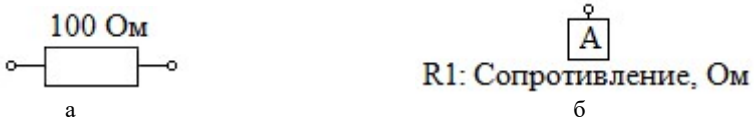


Рисунок 1.1 – Использование атрибутивных компонентов для параметризации компонентов технических объектов:
а – компонент технического объекта;

На логическом уровне многоуровневой КМ из алгоритмических компонентов и интерактивных математических панелей могут быть набраны выражения предварительного расчета параметров компонентов исследуемой модели УТО, представленной на объектном уровне, и блоки обработки результатов моделирования. В случае, если математическое выражение, предназначенное для вычисления параметров или обработки результатов моделирования, достаточно простое, оно может быть набрано из взаимосвязанных компонентов, каждый из которых отображает на логическом уровне редактора определенную математическую операцию (оператор или функцию). Для ввода и вычисления достаточно сложного математического выражения реализован компонент «Расчёт», который расположен в папке «Компоненты языка МАК»\«Панели». Приведенный на рис. 1.2, он представляет собой компонент с переменным числом связей n_1, n_2, \dots, n_n , находящихся слева от компонента, к которым подключаются компоненты, передающие в компонент «Расчёт» значения переменных, участвующие в расчете значений искомой величины. Для каждой из переменных в свойствах компонента «Расчёт» задается её имя, которым эта переменная представлена в математическом выражении, введенном пользователем в редакторе математико-алгоритмических выражений. Он открывается по двойному щелчку мыши по изображению данного компонента в многослойном редакторе компьютерных моделей реально-виртуальных экспериментов.

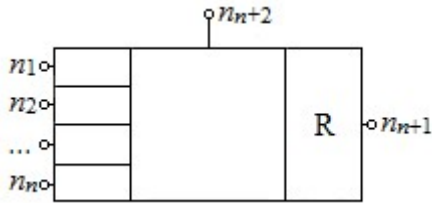


Рисунок 1.2 – Компонент «Интерактивная математическая панель»

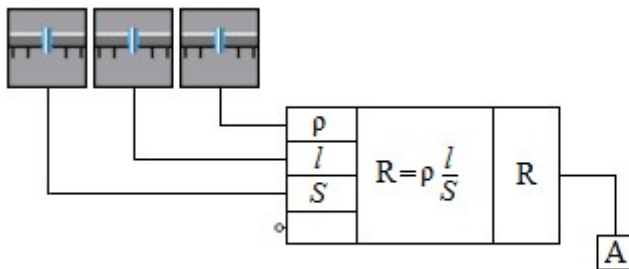
Также компонент «Расчёт» имеет одну связь n_{n+1} , находящуюся справа от него. С её помощью осуществляется передача результата вычисления математического выражения, введенного в редактор математико-алгоритмических выражений. Узел n_{n+2} предназначен для передачи данного выражения в компонент «Визуализатор математических выражений», который отображает его на визуальном уровне многоуровневой КМ УИМ.

К узлам n_1, n_2, \dots, n_n могут быть подключены:

- компоненты-регуляторы, предоставляющие возможность пользователю задавать значения соответствующих параметров анализируемой в УИМе модели технического объекта;
- компоненты-измерители результатов первичных измерений значений переменных расположенной на объектном уровне компьютерной модели исследуемого объекта.

Результаты выполняемых с помощью компонента «Расчёт» вычислений могут являться новыми значениями параметров модели объекта либо быть итоговыми результатами и выводиться на средства визуализации. На рис. 1.3 приведен пример расчета значения сопротивления резистора по удельному сопротивлению материала ρ , его длине l и диаметру d .

Для формирования блока расчета сопротивления резистора необходимо установить компонент «Расчёт», поставить три компонента «Регулятор с прямоугольным бегунком», которые находятся в папке «Визуальные компоненты»\«Визуальные компоненты L-V»\«Регуляторы\Индикаторы»\«Движковые»\«Индикатор с прямоугольным бегунком». Три этих индикатора необходимо подсоединить к компоненту «Расчёт», как показано на рис. 1.3.



R1: Сопротивление, Ом

Рисунок 1.3 – Предварительные расчеты с помощью компонента «Интерактивная математическая панель»

В случае применения компонента «Расчёт» для обработки результатов вычислительных экспериментов и вычисления их косвенных результатов на основе прямых он может быть подключен так, как показано на рис. 1.4, где V и A – измерительные компоненты – вольтметр и амперметр, осуществляющие передачу результатов моделирования с объектного уровня на логический.

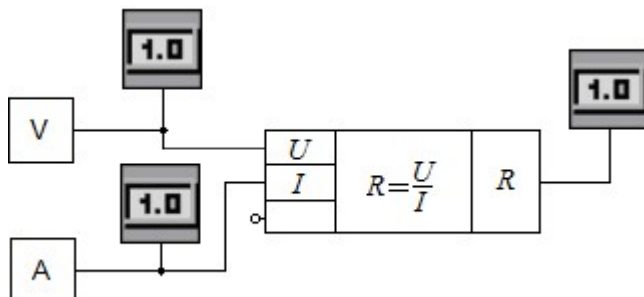


Рисунок 1.4 – Пример построения блока обработки результатов вычислительных экспериментов

Таким образом, предназначенный для интерактивной демонстрации некоторого теоретического положения, закона, теоремы или расчетной формулы некоторой учебной дисциплины учебно-иллюстративный модуль представляет собой многоуровневую компьютерную модель, созданную в системе виртуальных инструментов и приборов. На ее соответствующих уровнях, отображающихся на одноименных слоях многослойного редактора компьютерных моделей реально-виртуальных экспериментов, располагаются:

На объектном уровне должна быть сформирована компьютерная модель подлежащего изучению технического объекта. Все компоненты находятся в папке «Электротехника». Компонент «Резистор» R1, R2 и компонент «Земля» – в папке «Пассивные двухполюсники» папки «Электротехника», компонент «Источник» E1 – в папке «Источники», а компоненты «Вольтметр» V1 и «Амперметр» A1 – в папке «Измерительные компоненты» \ «Многоуровневые измерители». На рис. 1.5 представлена модель объекта, предназначенная для изучения закона Ома.

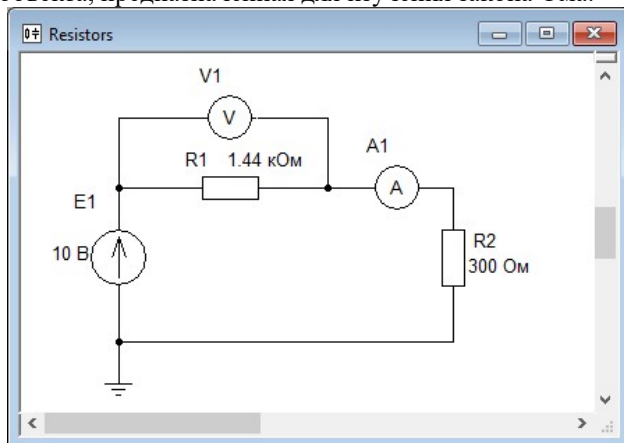


Рисунок 1.5 – Модель объекта для изучения закона Ома

На логическом уровне многоуровневой КМ УИМа с помощью компонента «Расчёт» и других математико-алгоритмических компонентов должны быть сформированы расчетные схемы, представленные на рисунках 1.3 и 1.4. Его шагами являются предварительный расчет параметров компонентов модели исследуемого объекта, а также компоненты математико-алгоритмической обработки результатов ее анализа. Полное содержание логического уровня формируемой многоуровневой компьютерной модели представлено на рисунке 1.6.

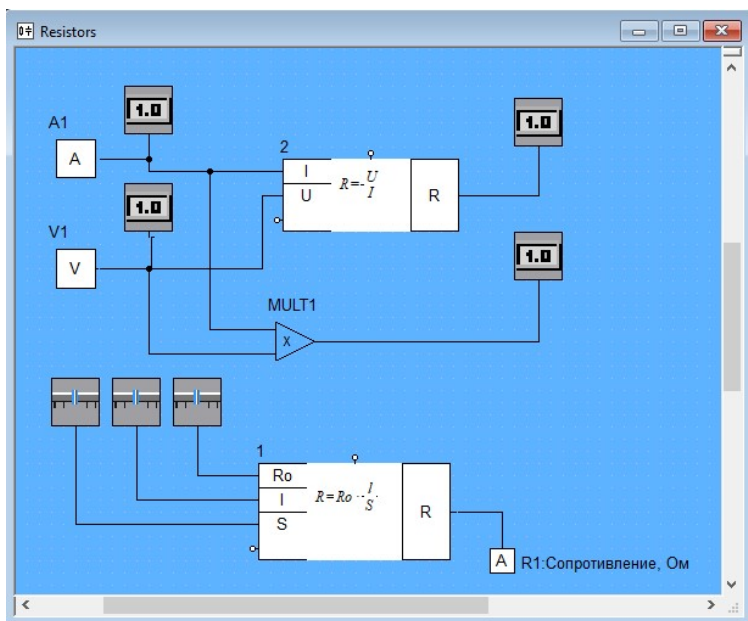


Рисунок 1.6 – Логический уровень УИМа для изучения закона Ома

Визуальный уровень включает в себя средства визуализации результатов расчетов и экспериментов, а также средства интерактивного изменения варьируемых параметров. В рассматриваемом случае, представленном на рисунке 1.7, – удельного сопротивления R_o , длины сопротивления l и площади поперечного сечения S .

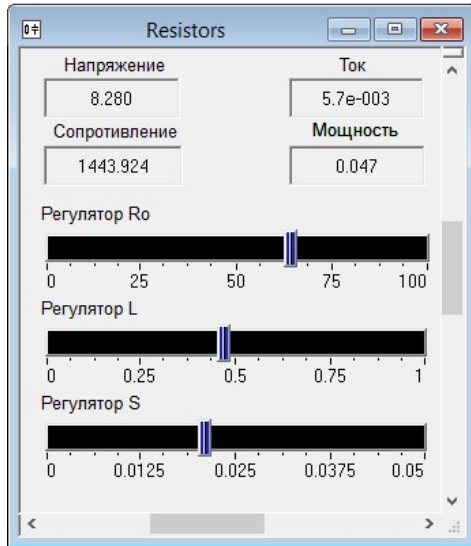


Рисунок 1.7 – Блок визуализации и интерактивного управления параметрами учебно-иллюстративного модуля

Для проведения эксперимента в окне «Параметры моделирования», которое открывается пунктом «Параметры моделирования» в меню «Анализ» (рис. 1.8), во вкладке «Статика» необходимо выбрать пункт «Эксперимент».

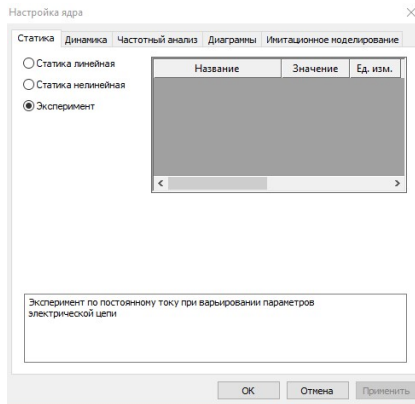


Рисунок 1.8 – Окно задания режима анализа

Запустите эксперимент и, варьируя значения параметров резистора $R1$ – удельного сопротивления, его длины и площади поперечного сечения, заполните таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Зависимость сопротивления, напряжения, тока и мощности от параметров резистора

Варьируемые параметры			Изменяемые характеристики			
ρ , Ом*мм ² /м	L	S	R	U	I	P
0,016	0,1	0,001				
	0,3	0,001				
	0,5	0,001				
0,024	0,1	0,005				
	0,3	0,005				
	0,5	0,005				
0,028	0,1	0,01				
	0,3	0,01				
	0,5	0,01				

Таким образом, построенный учебно-иллюстративный модуль, формирующийся на трех взаимосвязанных уровнях многоуровневой КМ ВП, включает в себя модель исследуемого объекта, блоки предварительного расчета параметров ее компонентов и блоки обработки результатов выполняемых вычислительных экспериментов.

5. Содержание отчета

5.1. Схема виртуального стенда для проведения эксперимента

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Данные измерений тока и напряжения в ER-схеме при варьировании параметрами функционала резистора, представленные в виде таблицы 1.1.

5.4. Заключение о выполнимости закона Ома в каждом эксперименте

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 2000. – 575 с.

2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Томск: Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа 2. Исследование источника вторичного электропитания

1. Цель работы

Исследование источника вторичного электропитания путём расчёта коэффициента пульсаций напряжения и тока в нагрузке при варьировании её сопротивления

2. Указания к выполнению работы

• **Обеспечение передачи мощности** – источник питания должен обеспечивать передачу заданной мощности с наименьшими потерями и соблюдением заданных характеристик на выходе без вреда для себя. Обычно мощность источника питания берут с некоторым запасом. Преобразование формы напряжения – преобразование переменного напряжения в постоянное, и наоборот, а также преобразование частоты, формирование импульсов напряжения и т.д. Чаще всего необходимо преобразование переменного напряжения промышленной частоты в постоянное (рис. 2.1).

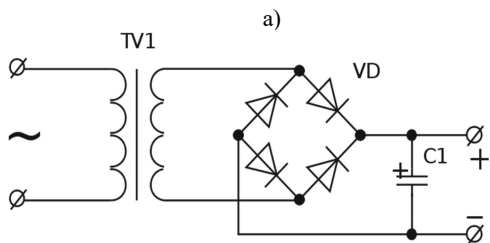
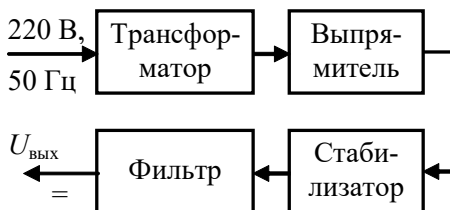


Рисунок 2.1 – Функциональная (а) и принципиальная схема простейшего трансформаторного источника питания без стабилизации с двухполупериодным выпрямителем (б)

- **Преобразование величины напряжения** – как повышение, так и понижение. Нередко необходим набор из нескольких напряжений различной величины для питания различных цепей.

- **Стабилизация** – напряжение, ток и другие параметры на выходе источника питания должны лежать в определённых пределах, в зависимости от его назначения при влиянии большого количества дестабилизирующих факторов: изменения напряжения на входе, тока нагрузки и т.д. Чаще всего необходима стабилизация напряжения на нагрузке, но иногда (например, для зарядки аккумуляторов) необходима стабилизация тока.

- **Защита** – напряжение, или ток нагрузки в случае неисправности (например, короткого замыкания) каких-либо цепей может превысить допустимые пределы и вывести электроприбор или сам источник питания из строя. Также во многих случаях требуется защита от прохождения тока по неправильному пути: например, прохождения тока через землю при прикосновении человека или постороннего предмета к токоведущим частям. Для того чтобы избежать критических режимов в цепи питания, ставят предохранители.

- **Гальваническая развязка цепей** – одна из мер защиты от протекания тока по неверному пути.

- **Регулировка** – в процессе эксплуатации может потребоваться изменение каких-либо параметров для обеспечения правильной работы электроприбора.

- **Управление** – может включать регулировку, включение / отключение каких-либо цепей или источника питания в целом. Может быть как непосредственным (с помощью органов управления на корпусе устройства), так и дистанционным, а также программным (обеспечение включения/выключения, регулировка в заданное время или с наступлением каких-либо событий).

- **Контроль** – отображение параметров на входе и выходе источника питания, включения/выключения цепей, срабатывания защит. Также может быть непосредственным или дистанционным.

Как правило, блок питания занимает до трети объема всей схемы. Соответственно и работа устройства в целом во многом зависит от надежности и параметров вторичного источника питания, поэтому намного эффективнее их специализировать под конкретную аппаратуру, чем использовать унифицированные модели.

3. Содержание работы

3.1. Сборка виртуального стенда для исследования коэффициента пульсаций источника вторичного электропитания

3.2. Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3. Проведение измерений тока и напряжения в нагрузке источника вторичного электропитания и расчет их коэффициентов пульсаций с помощью блоков обработки результатов экспериментов

3.4. Варьирование параметрами нагрузки

3.5. Проверка правильности вычисления коэффициента пульсаций

4. Порядок выполнения работы

Для исследования вторичного источника электропитания на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели формируется его схема (рис. 2.2), в которую включены следующие компоненты:

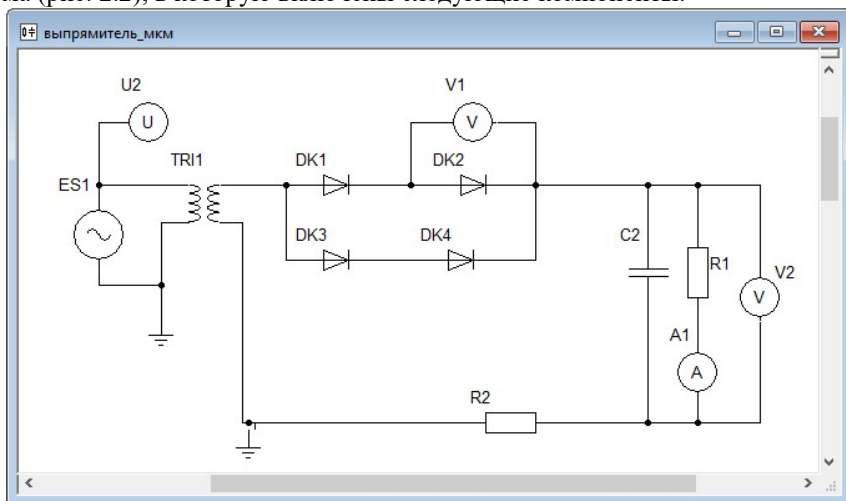


Рисунок 2.2 – Модель вторичного источника электропитания на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели

- первичный источник питания ES1;
- трансформатор TRI1;
- диодный мост, являющийся непосредственно выпрямителем и состоящий из диодов DK1, DK2, DK3 и DK4;
- C2 и R2 – представляющие в совокупности фильтр низких частот;
- R1, являющийся число резистивной нагрузкой.

Для обработки и визуализации результаты моделирования передаются с объектного уровня многоуровневой компьютерной модели на её логический уровень с помощью следующих измерительных компонентов:

– потенциометра U2, осуществляющего передачу входного напряжения (потенциала в указанной точке относительно общей для всей схемы земли);

– вольтметра V1, измеряющего и передающего значение напряжения на одном из плеч диодного моста;

– амперметра A1 и вольтметра V2, измеряющих и передающих на логический уровень ток и напряжение на нагрузке.

На логическом уровне многоуровневой компьютерной модели реализован алгоритм определения коэффициента пульсаций, который вычисляется по формуле

$$K_{II} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2 \cdot E_{cp}} \quad (2.1)$$

где E_{\max} – значение текущего локального максимума напряжения или тока; E_{\min} – значение текущего локального минимума напряжения или тока; E_{cp} – среднее значение напряжения или тока, вычисляемое по формуле

$$E_{cp} = \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2}. \quad (2.2)$$

Для вычисления коэффициента пульсаций напряжений и тока нагрузки на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели сформирована алгоритмическая компонентная цепь, представленная на рисунке 2.3.

С помощью компонентов-блоков обработки результатов LMAX1, LMIN1, LMAX2, LMIN2 на всём временном интервале анализа производится поиск значений локальных максимумов и минимумов напряжения на нагрузке, передаваемого с объектного уровня на логический компонент-вольтметром V2, и тока нагрузки, измеряемого и передаваемого компонентом-амперметром A1. Формула (2.2) для вычисления среднего значения напряжения нагрузки представлена компонентами SUM1 (сложение) и DIV2 (деление), а среднее значение тока нагрузки вычисляется компонентами SUM2 и DIV4. Коэффициент пульсаций вычисляется по формуле (2.1). Для вычисления коэффициента пульсаций напряжения она представлена компонентами DIF1 (вычитание) и DIV1, а для вычисления коэффициента пульсаций тока – компонентами DIF2 и DIV3. Для визуализации на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели

коэффициент пульсаций напряжения передается на цифровое табло T1, а коэффициент пульсаций тока – на цифровое табло T2.

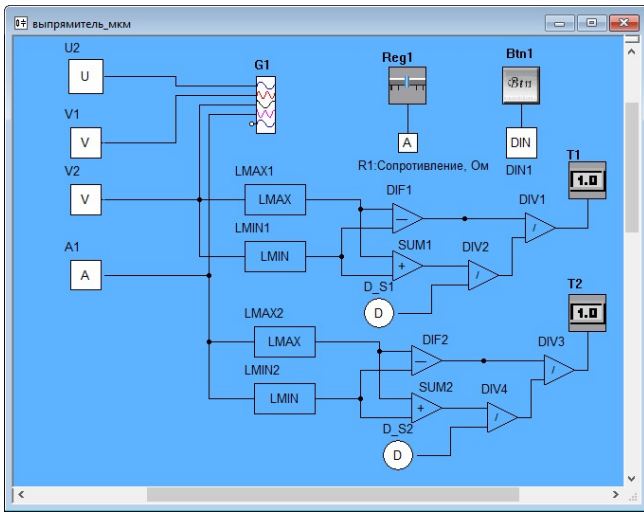


Рисунок 2.3 – Вычисление коэффициента пульсации тока и напряжения на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели

Регулятором Reg1 на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели пользователь имеет возможность изменять сопротивление резистора R1, которое передается от регулятора Reg1 на компонент-атрибут «R1:Сопротивление, Ом». Измерив коэффициент пульсаций, пользователь имеет возможность нажать на кнопку Btn1, которая связана с компонентом-директивой анализа DIN1 «Динамика неявная». Атрибутами данного компонента являются конечное время моделирования, минимальный и максимальный шаг моделирования, а также точность, которая задается для директив, у которых минимальный шаг моделирования не равен максимальному. Если они равны, то при поступлении сообщения на компонент DIN1 осуществляется анализ компонентной цепи объектного уровня с постоянным по времени шагом.

На визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели, представленном на рисунке 2.4, находятся:

- цифровое табло T1 «Коэффициент пульсаций U»;
- цифровое табло T2 «Коэффициент пульсаций I»;
- кнопка Btn1 «Анализ», для запуска очередной итерации анализа компонентной цепи объектного уровня;

– регулятор Reg1 «Сопротивление R1», с помощью которого пользователь имеет возможность варьировать сопротивление нагрузки исследуемой цепи.

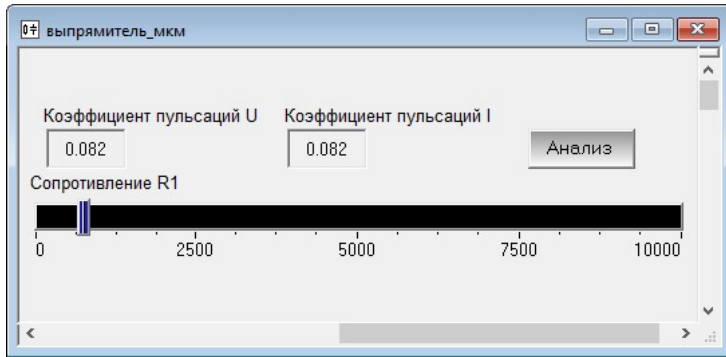


Рисунок 2.4 – Визуальный уровень многоуровневой компонентной цепи для исследования коэффициента пульсаций напряжения и тока нагрузки

Все напряжения и ток нагрузки, измеряемые компонентами: вольтметрами V1, V2, V3 и амперметром A1, на логическом уровне многоуровневой компонентной цепи (рис. 2.3) передаются на определенные входы компонента-графика G1. Им в отдельном окне формируются временные диаграммы измеряемых переменных, представленные на рис. 2.5.

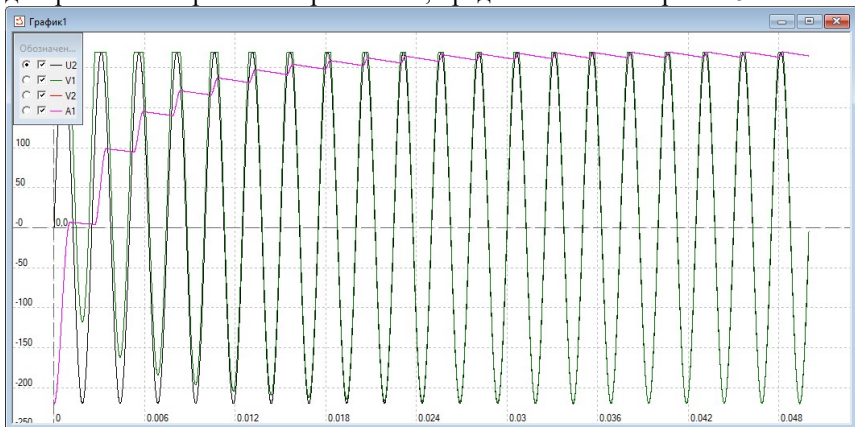


Рисунок 2.5 – Временные диаграммы напряжений и тока исследуемой модели источника вторичного электропитания

Пути изменения сопротивления нагрузки, необходимо исследовать изменение коэффициентов пульсаций напряжения и тока. Результаты исследования сформировать в виде таблицы 2.1

Таблица 2.1

Исследования коэффициентов пульсаций тока и напряжения нагрузки

Сопротивление нагрузки, Ом	Амплитуда напряжения, В	Коэффициент пульсаций напряжения	Амплитуда тока, А	Коэффициент пульсаций тока
500				
1 000				
1 500				
2 000				
2 500				
3 000				
3 500				
4 000				
4 500				
5 000				

Сделать вывод о зависимости коэффициентов пульсаций при изменении сопротивления нагрузки.

Аналогичным образом в среде многоуровневого компьютерного моделирования МАРС исследованию подлежат различные управляемые технические и технологические объекты, модели которых могут быть построены на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели.

5. Содержание отчета

5.1 Схема виртуального стенда для исследования коэффициента пульсаций источника вторичного электропитания

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Временные диаграммы тока и напряжения нагрузки источника вторичного электропитания

5.4 Результаты исследования, представленные в виде таблицы 2.1, и заключение о зависимости коэффициента пульсаций от сопротивления нагрузки

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Вересов Г.П. Электропитание бытовой аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.

2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа 3. Формирование многоуровневой компьютерной модели для исследования системы управления «Бетономешалка на электроприводе»

1. Цель работы:

Исследование параметров ПИД-регулятора для установления требуемого значения выходной величины (скорости вращения бетономешалки) с заданной точностью за минимальное время.

2. Указания по выполнению работы

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования.

Назначение ПИД-регулятора – в поддержании заданного значения x_0 некоторой величины x_c помощью изменения другой величины u . Значение x_0 называется заданным значением (или уставкой, в технике), а разность $e = (x_0 - x)$ – невязкой (или ошибкой регулирования, в технике), рассогласованием или отклонением величины от заданной. Приведённые ниже формулы справедливы в случае линейности и стационарности системы, что редко выполняется на практике.

Выходной сигнал регулятора u определяется тремя слагаемыми:

$$u(t) = P + I + D = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) dt + K_D \cdot \frac{de}{dt},$$

где K_p, K_I, K_D – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно.

Большинство методов настройки ПИД-регуляторов используют несколько иную формулу для выходного сигнала, в которой на пропорциональный коэффициент усиления умножены также интегрирующая и дифференцирующая составляющие:

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + K_{IP} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{DP} \frac{de}{dt} \right)$$

Теоретические методы анализа системы с ПИД-регулятором редко применяются на практике. Основная сложность практического применения – незнание характеристик объекта управления. Кроме того, существенную проблему представляют нелинейность и нестационарность системы. Практические регуляторы работают в ограниченном сверху и снизу диапазоне, поэтому в принципе нелинейны. В этой связи получили распространение методы экспериментальной настройки регулятора, подключенного к объекту управления. Прямое использование формируемой алгоритмом управляющей величины также имеет свою специфику. Например, при регулировке температуры часто управляют не одним, а двумя устройствами, одно из них управляет подачей горячего теплоносителя для нагрева, а другое управляет хладагентом для охлаждения. Часто рассматриваются три варианта практических регуляторов. В первом варианте, наиболее близком к теоретическому описанию, выход регулятора – непрерывная аналоговая ограниченная величина. Во втором случае выход представляет собой поток импульсов, который может управлять шаговым двигателем. В третьем случае выходной управляющий сигнал регулятора используется для широтно-импульсной модуляции.

В современных системах автоматизации, которые, как правило, строятся на базе PLC ПИД-регуляторы и реализуются либо как специализированные аппаратные модули, включаемые в состав управляющего контроллера, либо программными методами, с применением специализированных библиотек. Производители контроллеров часто разрабатывают специализированное ПО (тюнеры) для настройки коэффициентов регулятора.

3. Содержание отчета

3.1. Сборка виртуального стенда для экспериментального определения требуемых значений коэффициентов ПИД-регулятора

3.2. Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3. Проведение эксперимента, обеспечивающего нахождение коэффициентов ПИД-регулятора по заданным значениям показателей качества регулирования: выходной величины, времени переходного процесса и перерегулирования

3.4. Варьирование параметрами нагрузки и значений показателей качества регулирования

3.5. Проверка правильности вычисления значения коэффициентов ПИД-регулятора

4. Порядок выполнения работы

Требуется определить значения коэффициентов ПИД-регулятора напряжения, обеспечивающего разгон электропривода миксера при заданной нагрузке до заданной скорости вращения за минимально возможное время.

Шаг 1. Построение формализованного представления задачи. Сформулированная задача относится к классу задач экспериментирования при варьировании коэффициентов ПИД-регулятора. При этом, путем изменения коэффициентов ПИД-регулятора необходимо установить требуемую скорость вращения лопасти в бетономешалке, а также замерить и вывести на панель визуализации и интерактивного управления значения времени переходного процесса, в течение которого должен быть осуществлен разгон лопасти до нужной скорости.

Шаг 2. Разработка и анализ функциональной схемы устройства. Структурно-функциональная схема устройства «Бетономешалка на электроприводе» приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Структурно-функциональная схема устройства «Бетономешалка на электроприводе»

С помощью *источника задающего воздействия (напряжения)* производится задание значения напряжения, пропорционального необходимой скорости вращения лопасти бетономешалки вне зависимости от нагрузки среды, которая в ней перемешивается.

ПИД-регулятор напряжения, являясь одновременно *сравнивающим устройством*, производит выработку напряжения малой мощности, соответствующей требуемой скорости вращения бетономешалки.

Электромашиный усилитель осуществляет преобразование мало-мощного сигнала ПИД-регулятора в электрический сигнал мощности, необходимой для развития заданной скорости двигателя.

Двигатель производит преобразование электрического сигнала, подаваемого электромашиным усилителем, в механическую энергию вращения вала, на который прикреплена бетономешалка.

Бетономешалка является основным объектом управления и предназначена для перемешивания смесей веществ различной вязкости, от которой зависит скорость её вращения при постоянном электрическом сигнале, подаваемом на двигатель.

Тахогенератор предназначен для измерения текущей скорости бетономешалки, и выработки пропорционального ей информационного сигнала.

Усилитель звена обратной связи осуществляет преобразование информационного сигнала тахогенератора в пропорциональное ему электрическое напряжение.

Шаг 3. Разработка модели исследуемого объекта. Модель исследуемого объекта «Бетономешалка на электроприводе» формируется по представленной на рисунке 3.1 его структурно-функциональной схеме на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели из компонентов языка моделирования технических объектов, хранящихся в папке «ЭлектроСАУ» папки «САУ». Представленная на рисунке 3.2, она включает в себя следующие компоненты:

- E1 – источник задающего воздействия, который находится в папке «Источники» папки «Электротехника»;
- R2 – резистор, находящийся в папке «Пассивные двухполюсники» папки «Электротехника»;
- PID1 – ПИД-регулятор напряжения, осуществляющий регулирование подачи напряжения на электромеханический преобразователь, который расположен в папке «ЭлектроСАУ» каталога «САУ». В ней также можно найти электромашинный усилитель EMU1, двигатель DR1, пропеллер V2, которым выражена бетономешалка, а также тахогенератор TG1;
- EMU1 – электромашинный усилитель, осуществляющий преобразование электрической энергии в энергию магнитного поля, расположен в папке «ЭлектроСАУ» каталога «САУ»;
- DR1 – двигатель, осуществляющий преобразование энергии магнитного поля в механическую энергию, необходимую для вращения бетономешалки, находится в папке «ЭлектроСАУ» каталога «САУ»;

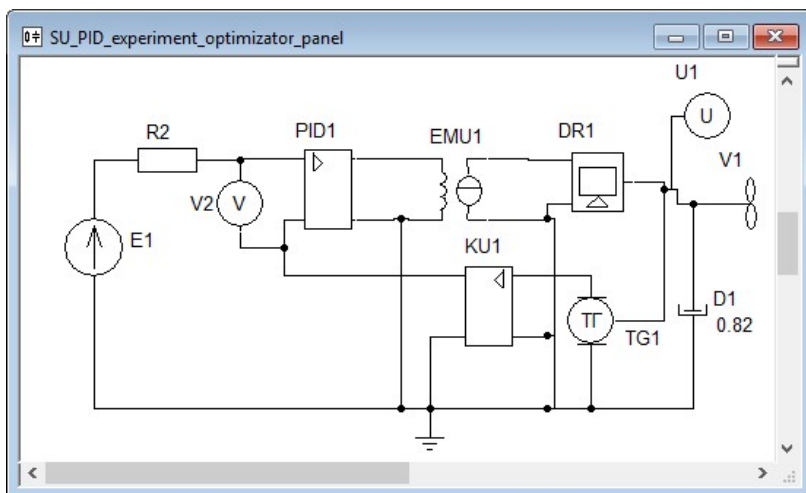


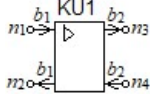
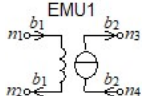
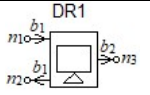

Рисунок 3.2 – Система автоматического управления «Миксер на электроприводе»

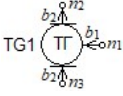
- V1 – бетономешалка (вращающаяся часть со смесью веществ);
- D1 – демпфер, отражающий сопротивление смеси веществ, находящейся в бетономешалке. Он находится в папке «Механика одномерная»;
- TG1 – тахогенератор, осуществляющий измерение текущей скорости вращения бетономешалки и передающий его в обратную связь;
- KU1 – усилитель сигнала обратной связи, которым является ПИД-регулятор PID2 с коэффициентами $K_p = 1, K_I = 0, K_D = 0$;
- измерительные компоненты: потенциометр U1 и вольтметр V2 необходимо взять их каталога «Электротехника»\«Измерительные компоненты» \ «Многоуровневые компоненты». Они имеют свои отображения одновременно на объектном и логическом уровнях многослойного редактора.

В таблице 3.1 приведены математические модели соответствующих компонентов, а также назначения их параметров.

Таблица 3.1

Математически модели компонентов компонентной цепи
исследуемой модели

Название компонента	Изображение компонента	Математическая модель	Параметры
ПИД-регулятор		$K_D \cdot \frac{d(V_{n1} - V_{n2})}{dt} + K_P \cdot (V_{n1} - V_{n2}) + K_I \cdot \int (V_{n1} - V_{n2}) dt = V_{n3} - V_{n4}$	K_D – дифференциальный коэффициент; K_P – пропорциональный коэффициент; K_I – интегральный коэффициент
Электромашиный усилитель (ЭМУ)		$T_{EMU} \cdot \frac{d}{dt}(V_{n3} - V_{n4}) = K_P \cdot (V_{n1} - V_{n2}) - (V_{n3} - V_{n4})$	T_{EMU} – электромашиная постоянная времени; K_P – коэффициент пропорциональности
Двигатель		$La \cdot \frac{d(V_{b1})}{dt} = (V_{n1} - V_{n2}) - K_M \cdot V_{n3} - Ra \cdot V_{b1}$ $J \cdot \frac{dV_{n3}}{dt} = K_I \cdot V_{b1} + V_{b2}$	La – индуктивность обмотки возбуждения двигателя; Ra – активное сопротивление обмотки возбуждения двигателя; K_M – коэффициент момента; J – момент инерции; K_I – коэффициент передачи тока;
Лопасть вентилятора (пропеллер)		$J \cdot \frac{dV_{b1}}{dt} = V_{b1} - K_P \cdot V_{n1}$	J – момент инерции; K_P – коэффициент пропорциональности;

1	2	3	4
Тахогенератор		$V_{n2} - V_{n3} - K_{TG} \cdot V_{n1} = 0$ $V_{b1} = 0$	K_{TG} – коэффициент преобразования тахогенератора

Шаг 3. Формирование компонентной цепи сценария исследования и проектирования УТО. Для решения сформулированной задачи экспериментального определения показателей качества переходного процесса: точности регулирования (установившееся значение скорости вращения), времени переходного процесса и перерегулирования в САУ «Бетономешалка на электроприводе» на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели сформирована алгоритмическая компонентная цепь, представленная на рисунке 3.3.

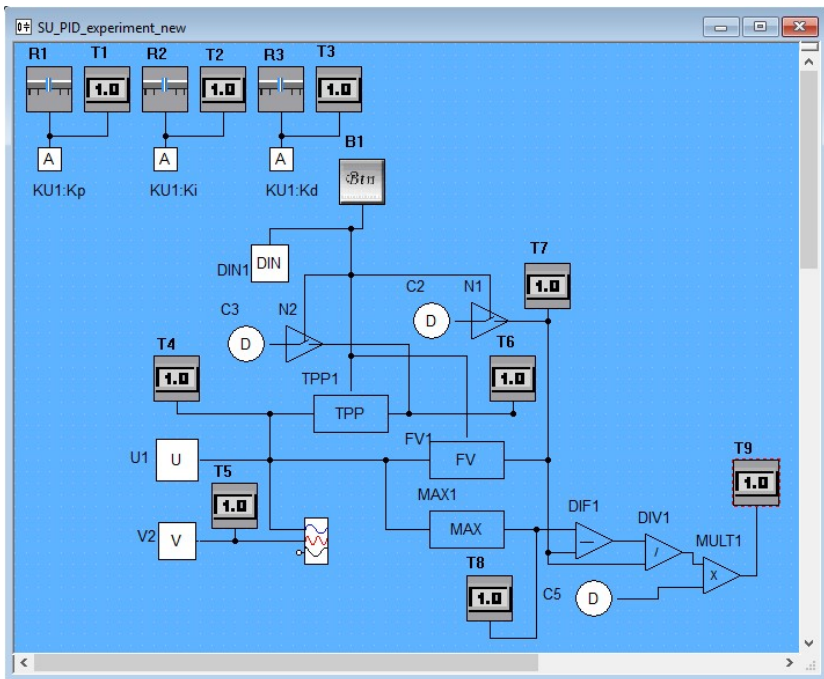
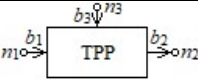


Рисунок 3.3 – Алгоритмическая компонентная цепь для решения задачи параметрической оптимизации

Таблица 3.2

Компоненты блоки обработки данных
вычислительных экспериментов

Название и обозначение	Визуальный вид компонента на логическом уровне	Математическая модель	Типы данных и условия
Установившееся значение		$V_{n2} = FV(V_{n1})$	Если $V_{n3} \neq 0$, процесс определения установившегося значения начинается заново
Время переходного процесса		$V_{n2} = TPP(V_{n1})$	
Максимальное значение		$V_{n2} = MAX(V_{n1})$	

Представленные в таблице 3.2 компоненты-блоки обработки данных вычислительных экспериментов на свой вход $S_1 = (b_1 \eta^- n_1)$ принимают подлежащую обработке временную характеристику и определяют её соответствующий параметр-функционал (в данном случае установившееся значение и время переходного процесса). Когда его значение определено, оно передается на выход $S_2 = (b_2 \eta^+ n_2)$. Так как при решении различных задач может производиться несколько запусков одновариантного анализа, то на вход $S_3 = (b_3 \eta^- n_3)$ подается сигнал о начале очередного вычислительного эксперимента в универсальном вычислительном ядре.

Регуляторами R1 «P», R2 «I», R3 «D», которые находятся в каталоге «Визуальные компоненты»\«Визуальные компоненты L-V»\ «Регуляторы/индикаторы», на визуальном слое редактора во время работы модели задаются начальные значения коэффициентов ПИД-регулятора. Соответствующие компоненты-атрибуты ПИД-регулятора PID1 устанавливаются на логическом слое путем выбора соответствующих параметров в подменю «Связь с атрибутом» в меню, которое открывается правой кнопкой мыши по изображению компонента PID1 на объектном слое редактора. Точные значения коэффициентов, установленные с помощью регуляторов, визуализируются как при помощи выше перечисленных регуляторов, так и при помощи цифровых табло T1, T2 и T3, которые находятся в каталоге «Визуальные компоненты»\«Визуальные компоненты L-V»\«Прочие». Запуск очередного анализа с установленными значениями

коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется пользователем с визуального слоя путем нажатия на кнопку В1 «Запуск». Кнопка В1 является компонентом «Кнопка с надписью», который расположен в каталоге **Визуальные компоненты\Визуальные компоненты L-V\Кнопки**.

Результаты моделирования в виде текущего значения скорости вращения бетономешалки и ошибки между задающим воздействием (источник Е1) и сигналом, пропорциональным скорости вращения лопасти миксера и снимаемым с тахогенератора ТG1, передаются с объектного на логический уровень компонентами U1 и V2. Данные значения отображаются пользователю на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели с помощью цифровых табло Т4 «Значение» и Т5 «Рассогласование» соответственно.

Для определения установившегося значения при каждом анализе модели объектного уровня используется компонент FV1, а для нахождения времени переходного процесса – компонент ТРР1. Эти компоненты, являясь блоками обработки результатов вычислительных экспериментов, расположены в папке «Компоненты языка МАК»\«Блоки обработки». Для отображения на визуальном уровне времени переходного процесса используется цифровое табло Т6 «Трр», вывод установившегося значения осуществляется цифровым табло Т7 «Ууст», визуализация максимального значения производится цифровым табло Т8 «МАХ», цифровым табло Т9 «S» осуществляется визуализация перерегулирования. Цифровые табло находятся в каталоге **Визуальные компоненты\Визуальные компоненты L-V\Прочие**.

Шаг 4. Разработка панели визуализации и интерактивного управления. На рис. 3.4 представлена панель визуализации и интерактивного управления модели для экспериментального определения значений коэффициентов ПИД-регулятора для бетономешалки. Она содержит:

- цифровое табло Т1 «Р» для отображения текущего значения пропорционального коэффициента ПИД-регулятора;
- цифровое табло Т2 «I» для визуализации текущего значения интегрального коэффициента ПИД-регулятора;

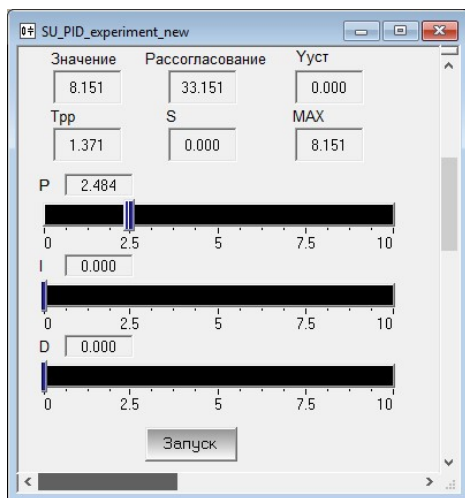




Рисунок 3.4 – Панель визуализации и интерактивного управления многоуровневой модели решения задачи оптимизации скорости вращения лопасти миксера

- цифровое табло T3 «D» для отображения текущего значения дифференциального коэффициента ПИД-регулятора;
- цифровое табло T4 «Значение» для отображения текущего значения скорости вращения лопасти миксера;
- цифровое табло T5 «Рассогласование» для визуализации текущего значения ошибки управления;
- цифровое табло T6 «Тпр» для визуализации времени переходного процесса;
- цифровое табло T7 «Ууст» для отображения установившегося значения скорости вращения лопасти миксера;
- цифровое табло T8 «MAX» для отображения максимального значения выходной величины;
- цифровое табло T9 «S» для визуализации перерегулирования;
- регулятор R1 «P» для установки начального значения пропорционального коэффициента ПИД-регулятора;
- регулятор R2 «I» для установки начального значения интегрального коэффициента ПИД-регулятора;
- регулятор R3 «D» для установки начального значения дифференциального коэффициента ПИД-регулятора;
- кнопка B1 «Запуск» для запуска очередной итерации эксперимента с изменением значений коэффициентов ПИД-регулятора.

Шаг 5. Запуск модели на анализ. Для запуска модели на анализ пользователь должен нажать кнопку . Задавая значения требуемой скорости вращения лопасти миксера w^* при нажатии на кнопку  осуществляется запуск задачи поиска коэффициентов ПИД-регулятора, при которых скорость вращения лопасти миксера $W_{уст}$ будет соответствовать заданной скорости вращения

5. Содержание отчета

5.1. Схема виртуального стенда для исследования зависимости показателей качества управления скоростью вращения лопасти миксера от значений коэффициентов ПИД-регулятора

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Зависимость показателей качества управления скоростью вращения лопасти миксера от значений коэффициентов ПИД-регулятора

5.4. Заключение об исследовании зависимостей

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа 4. Разработка и отладка сценариев управления на компьютерных моделях химико-технологических систем

1. Цель работы

Формирование и отладка сценария функционирования устройства управления сложной технической управляемой системы (СТУС) и выбор соответствующих значений постоянных времени исполнительных устройств, обеспечивающих бесперебойную работу объекта управления (ОУ).

2. Указания к выполнению работы

Многоуровневая компьютерная модель (КМ) СТУС представляется графически в виде трех взаимосвязанных уровней. Она будет включать в себя модель ОУ и средства подключения к реальному объекту, имитационную модель алгоритма автоматизированного эксперимента, в которую входит функциональная модель устройства управления СТУС, а также взаимосвязанную с ними панель визуализации и интерактивного управления.

Под уровнем представления модели (уровнем моделирования) будем понимать степень абстракции, способ представления и обработки информации об исследуемой СТУС, ее моделях, методах обработки данных, средствах визуализации промежуточных и итоговых результатов экспериментов.

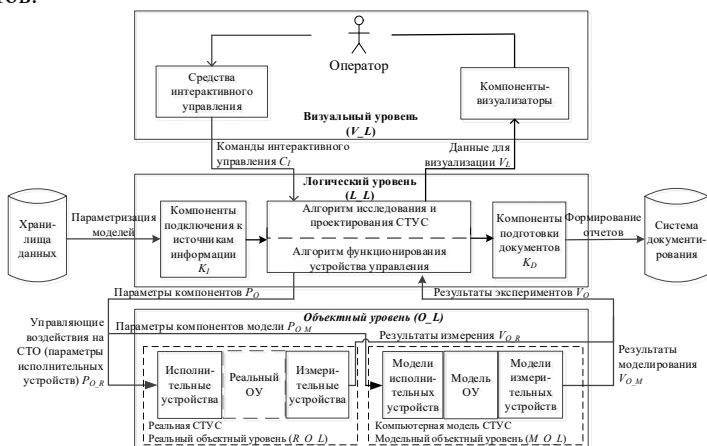


Рисунок 4.1 – Структура многоуровневой компьютерной модели СТУС

Многоуровневая КМ, предназначенная для построения компьютерных моделей СТУС и выполнения автоматизированных экспериментов научно-исследовательского, проектного и учебного назначения, представлена на рисунке 4.1 и состоит из следующих взаимосвязанных уровней:

– объектного уровня, включающего в себя компьютерную модель СТУС, состоящая из КМ ОУ с подключенными к ней компьютерными моделями измерительных устройств (ИЗМУ) и исполнительных устройств (ИспУ), а также реальный ОУ. Представление компьютерной модели СТУС производится на модельном объектном уровне. Реальный ОУ совместно с платами сбора данных и измерительными контроллерами, объединенные в реальную СТУС, образуют реальный объектный уровень;

– логического уровня, на котором в виде алгоритмической КЦ отображается алгоритм исследования и функционального проектирования СТУС, интегрированный с алгоритмом функционирования устройства управления. Ее работа основана на использовании результатов анализа модели СТУС и данных измерения реальной системы, передаваемых с объектного уровня. Модель алгоритма включает в себя команды параметризации КМ СТУС, математические средства анализа, обработки результатов моделирования и измерения, их визуализации, а также средства принятия управленческих решений, направленных на изменение значений параметров компонентов модели и управляющих воздействий на реальную СТУС. Каждая команда алгоритма исследования и функционального проектирования СТУС должна быть представлена алгоритмической КЦ, принадлежащей логическому уровню, графически в виде набора компонентов, входные связи каждого из которых соответствуют аргументам описываемой им команды, а выходные – результатам ее выполнения. Ее работа основана на рассматриваемом далее алгоритме передачи сообщений, относящемся к классу алгоритмов имитационного (дискретно-событийного) моделирования;

– визуального уровня отображения информации о текущих результатах выполнения шагов алгоритма исследования и функционального проектирования СТУС, включающего алгоритм функционирования УУ. На данном уровне реализуется панель визуализации и интерактивного управления, представленная визуальной КЦ. Она включает в себя компоненты-визуализаторы, предназначенные для отображения пользователю подлежащих визуализации данных, а также средства интерактивного управления, называемые управляющими компонентами и позволяющие формировать соответствующие команды управления.

Предложенная структура многоуровневой компонентной цепи (КЦ), являющейся компьютерной моделью в формате метода многоуровневых компонентных цепей, открывает возможности отладки сценариев управ-

ления, представленных своими имитационными моделями на логическом уровне многоуровневой КЦ. Их основной задачей является анализ результатов моделирования ХТС, представленных значениями наблюдаемых переменных, и выработка на их основе соответствующих управляющих воздействий на модели исполнительных устройств (ИспУ). При решении данных задач помимо компонентов ХТС в подцепь объектного уровня МКЦ входят компоненты исполнительных и измерительных устройств.

3. Содержание работы

3.1. Сборка многоуровневой компонентной цепи для проведения эксперимента

3.2. Определение содержания каждого уровня многоуровневой компьютерной модели

3.3. Проведение эксперимента для выявления наиболее подходящих постоянных времени сервоприводов открывающего и закрывающего клапанов

3.4. Варьирование параметрами давления входного и выходного потока

3.5. Проверка заполнения и опустошения баллона до заданных предельных значений

4. Порядок проведения работы

Рассмотрим процесс формирования и отладки сценариев управления на примере многоуровневой компонентной цепи поддержания давления газа в баллоне (газохранилище). Пусть изначально баллон пустой. Он заполняется по входной линии, в которой газовый поток проходит через клапан С11. Выходная линия доставляет газ потребителю. Она управляется клапаном С12. Доля открытия каждого из клапанов изменяется в пределах от закрытой до полностью открытой соответствующими сервоприводами, работающими по аperiodическому закону с коэффициентом усиления $K=1$ и варьированной постоянной времени. Изменение состояния обоих клапанов производится по сигналам, когда давление газа в баллоне достигает определенного порогового давления.

Модели баллона, Источника смеси веществ, клапана, потребителя находятся в папке **Химико-технологическая система** дерева компонентов.

Пусть имеется два пороговых значения:

– $P_1 = d_1 \cdot P_{\max}$, при котором должен начинать закрываться клапан С12 и открываться клапан С11;

– $P_2 = d_2 \cdot P_{\max}$, являющееся началом закрытия входного клапана C11 и открытия выходного клапана C12.

Основной задачей отладки сценариев управления является нахождение таких пороговых значений d_1 и d_2 (где $d_i \in [0, 1], i = 1, 2$), при которых давление газа в баллоне не будет превышать максимального значения P_{\max} , а также будет соблюдаться режим бесперебойного снабжения газом потребителей. То есть давление газа не должно стать равным 0.

На рисунке 4.1 представлена объектная подцепь многоуровневой компонентной цепи системы поддержания газа в баллоне. Помимо этого компонентами аperiodических звеньев AZ1 и AZ2, входящих в папку САУ, представлены модели электромеханических приводов, подключенных к вентилям клапанов C11 и C12 и управляющих степенью их открытия. Применяемые электромеханические привода, осуществляющие управление долей открытия клапанов, могут быть представлены аperiodическими звеньями первого порядка AZ1 и AZ2 с заданной постоянной времени T и единичным коэффициентом передачи $K = 1$. При этом постоянные времени приводов могут быть в общем случае различными. С помощью компонента «Измеритель информационного сигнала», находящегося в папке САУ дерева компонентов, степень открытия клапанов на логическом уровне многоуровневой КЦ передается атрибуту «Доля открытия клапана» соответствующих клапанов. Для установки атрибута необходимо нажать правую кнопку мыши по изображению соответствующего клапана на объектном уровне редактора и выбрать пункт **Доля открытия клапана** в меню **Связь с атрибутом** выпадающего меню компонента.

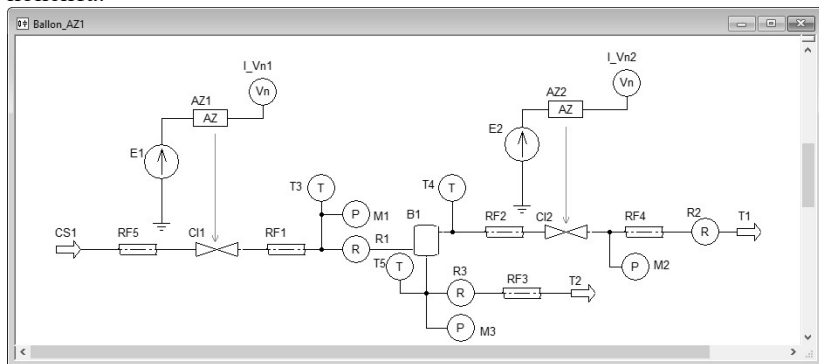


Рисунок 4.2 – Компьютерная модель системы поддержания давления газа в баллоне на объектном уровне многоуровневой КМ

В КЦ объектного уровня многоуровневой КЦ системы поддержания давления газа в баллоне входят следующие измерительные компоненты: манометры M1, M2 и M3, осуществляющие давление газа на входе, выходе и внутри баллона соответственно: T3, T4 и T4 –термометры, измеряющие температуру в соответствующих точках модели системы; R1, R2 – расходомеры, передающие на логический уровень многоуровневой КЦ соответствующие текущие скорости расходов газа; расходомер R3 – для измерения текущего количества газа в баллоне. Перечисленные измерители: манометр, расходомер, термометр находятся в папке **Химико-технологическая система** дерева компонентов.

На логическом уровне многоуровневой КЦ с использованием значения текущего давления газа, передаваемого с объектного слоя манометром M3, построена алгоритмическая компонентная подцепь сценария функционирования устройства управления, представленная на рисунке 4.3. Его задачей является поддержание давления газа в баллоне в заданных пределах. Это значение, с учетом заданной инерционности клапанов, не должно превышать максимального значения, для предотвращения аварийной ситуации в баллоне, а также не должно быть меньше минимального с целью бесперебойной поставки газа потребителям.

Минимальное значение давления газа в баллоне, при котором должен начать закрываться выходной клапан и одновременно открываться входной, определяется умножением максимального значения давления на пороговое значение, задаваемое регулятором d1. Эта операция осуществляется компонентом-умножителем MULT2. Если текущее значение давления газа в баллоне меньше полученного значения от источника D_S1 на компонент-атрибут «E1: Амплитуда, В» подается значение 0, а от источника D_S2 на компонент-атрибут «E2: Амплитуда, В» – значение 1. При этом начинается закрытие выходного клапана и открытие входного.

Когда текущее значение давления в газе становится выше значения, задаваемого регулятором d2, что проверяется с помощью компонента Ab1, производится закрытие выходного клапана и открытие входного. Для этого от источника D_S3 на компонент «E1: Амплитуда, В» подается значение 1 и от источника D_S4 на компонент-атрибут «E2: Амплитуда, В» – значение 0. Это является началом закрытия входного и открытия выходного клапана.

Все алгоритмические компоненты, включённые в алгоритмическую компонентную цепь функционирования устройства управления поддержания давления газа в баллоне, находятся в папке **Компоненты языка МАК**: компонент «Умножение» в папке **Математические компоненты**; компоненты операций сравнения в папке **Операторы сравнения**; компонент «Накопитель», осуществляющий пропускание значений, когда на его

На нем с помощью графического компонента В1 изменением цвета отображается степень заполнения баллона. Аналогично изменение цвета индикаторов С11 и С12, а также с помощью регуляторов «Клапан входной» и «Клапан выходной» осуществляется отображение текущего значения степени открытия клапанов. Данные регулятора находятся в папке **Визуальные компоненты\визуальные компоненты L-V\Регуляторы/индикаторы\ движковые** Соответствующими цифровыми табло, расположенными в папке **Визуальные компоненты\ визуальные компоненты L-V\Прочие**, в числовой форме визуализируются текущие значения переменных и параметров компьютерной модели. С целью отладки сценариев управления пользователь имеет возможность изменения пороговых значений $d1$ и $d2$. Для этого на визуальном уровне должны быть расположены соответствующие компоненты-регуляторы. Для безопасного и эффективного использования баллона (газохранилища) они должны быть установлены таким образом, чтобы при заданных постоянных времени сервоприводов, осуществляющих управление состоянием клапанов, баллон полностью не опустошался, а также давление в нем не превышало максимального значения, но достигало этого значения при заполнении баллона.

Регуляторами «Постоянная времени клапана С11» и «Постоянная времени клапана С12» пользователь имеет возможность варьировать постоянные времени аperiodических звеньев AZ1 и AZ2, отражающих в модели привода управления состоянием входного и выходного клапанов соответственно. Изменяя постоянные времени клапанов С11 и С12, исследовать скорости открытия и закрытия клапанов, фиксируя при этом значения максимального и минимального заполнения баллона. На основе проводимых исследований заполнить таблицу 4.1. Сделать выводы и скорости и полноте наполнения баллона

Таблица 4.1

Таблица экспериментальных данных заполнения баллона

Постоянная времени входного клапана С11	Постоянная времени выходного клапана С12	Максимальный объем заполнения баллона V_{max}	Минимальный объем заполнения баллона V_{min}
1	2	3	4
0.2	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		

Продолжение табл. 4.1

1	2	3	4
0.4	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		
0.6	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		
0.8	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		
1	0.2		
	0.4		
	0.6		
	0.8		
	1		

5. *Содержание отчета*

5.1. Схема виртуального стенда для исследования постоянных времени и установка системы управления поддержанием газа в газохранилище

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Зависимость минимального и максимально наполнения баллона от постоянных времени сервоприводов входного и выходного клапанов

5.4. Заключение об исследовании зависимости постоянных времени от уставок

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004. –365 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа 5. Решение задачи проектирования теплообменного аппарата

1. Цель работы

Разработка многоуровневой компонентной цепи для автоматизации решения задач функционального проектирования химико-технологических аппаратов на примере определения минимальной длины теплообменника, при которой теплоносители на выходе имеют одинаковую температуру.

2. Указания к выполнению работы

Любой объект служит лишь материальным носителем функции, то есть функция – первична, объект – вторичен и создается по причине невозможности иными, нематериальными средствами удовлетворить потребности людей. Функциональное проектирование нацелено, прежде всего, на создание эффективно работающего объекта. Выполнение требуемой функции – главная цель и основа разработки объекта. Во внимание принимается, прежде всего, функциональные показатели качества и показатели надёжности.

Функциональное проектирование, нацеленное не только на поиск функционально эффективных решений, но и удовлетворение разных, порой противоречивых потребностей людей, обоснованный было оптимального варианта, называется *оптимальным проектированием*. Активно оно начало применяться со второй половины XX века благодаря достижениям теории принятия решений, теории исследования операций и широкому распространению вычислительной техники, позволившим разработать соответствующие методы, в обозримые сроки просчитать многочисленные варианты и решать сложные математические задачи.

Многоуровневые компонентные цепи позволяют решать задачи функционального, в том числе оптимального проектирования СТУС, когда по заданным входным данным необходимо определить значения параметров некоторого аппарата химической промышленности, при которых соответствующие выходные переменные будут иметь заданные значения. Решение таких задач основано на использовании алгоритмов параметрической оптимизации при варьировании значений подлежащих определению параметров аппарата.

3. Содержание работы

3.1. Сборка многоуровневой компьютерной модели для автоматизации решения задач функционального моделирования на основе методов поисковой оптимизации

3.2. Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3. Проведение оптимизационных экспериментов с различными значениями горячего и холодного теплоносителей на входе теплообменного аппарата

3.4. Исследование оптимальной длины теплообменника при варьировании входными объемными расходами теплоносителей

3.5. Проверка правильности определения минимальной длины теплообменного аппарата, при которой теплоносители на выходе теплообменника имеют одинаковую температуру

4. Порядок проведения работы

Пусть требуется определить минимальную длину теплообменного аппарата, в который под давлением 10 МПа объемным расходом 1 кмоль/с подаются два теплоносителя – горячий при температуре 353 К и холодный температурой 303 К. В качестве теплоносителей используется добытый природный газ, коэффициенты для расчета теплоемкости для которого определяются по формуле

$$CP(T) = \sum_{i=1}^{N_C} CP_i(T) \cdot C_i, \quad (5.1)$$

где CP_i – удельные теплопроводности веществ, входящих в соответствующий теплоноситель; C_i – концентрации веществ в этом теплоносителе.

Диаметр теплообменника 0.2 м, коэффициент теплопередачи – 1600 Вт/(м²*К).

При решении данной задачи минимизации подлежит целевая функция вида

$$F(L) = (T_H - T_C)^2, \quad (5.2)$$

где T_H – температура горячего теплоносителя на выходе теплообменника длиной L , T_C – температура холодного теплоносителя на его выходе.

Решение данной задачи выполнено с помощью многоуровневой КЦ, на объектном уровне которой сформирована представленная на рисунке 5.1 подцепь теплообменной секции типовой установки комплексной подготовки газа, которая эксплуатируется на газовых и газоконденсатных месторождениях Российской Федерации. С помощью источника CS1 в теплообменник TO1 подается горячий теплоноситель, а источником CS2 – холодный теплоноситель.

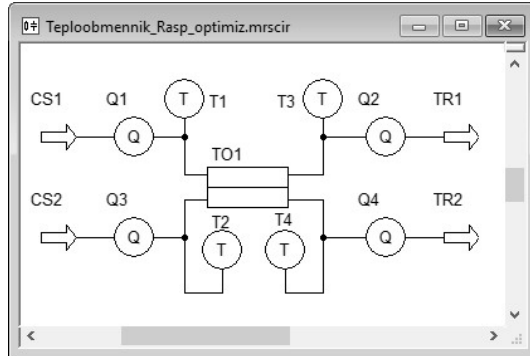


Рисунок 5.1 – Модель теплообменной секции установки комплексной подготовки газа

Температуры теплоносителей на выходе теплообменника передаются с объектного уровня МКЦ на логический соответствующими термометрами: T3 измеряет температуру горячего теплоносителя, а T4 – холодного теплоносителя. Относительно передаваемых значений с помощью компонентов DIF1 и DEG1 осуществляется расчет целевой функции (5.2) при различных значениях длины теплообменника. Её значение передается компоненту-оптимизатору Optim1, который на основе метода покоординатного спуска, адаптированного для минимизации целевых функций с одним аргументом, осуществляет поиск минимума целевой функции. Задав определенное значение длине теплообменника с помощью компонента-атрибута «TO1: Длина», запускается нелинейный статический анализ КЦ объектного уровня.

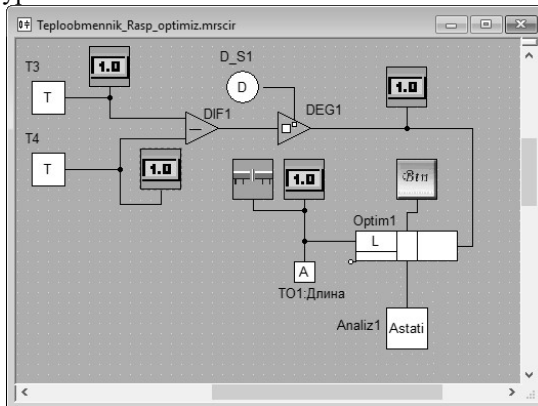


Рисунок 5.2 – Алгоритмическая компонентная цепь решения задачи поиска минимальной длины теплообменника

Для запуска очередной итерации её анализа, сформированной на объектном уровне многоуровневой КЦ, компонент-оптимизатор Optim1 передает команду запуска на нелинейный статический анализ компоненту Analiz1. Алгоритмическая компонентная подцепь, соответствующая описанному сценарию, приведена на рисунке 5.2.

На рисунке 5.3 представлена лицевая панель для решения задачи определения минимальной длины теплообменника, являющаяся визуальной подцепью МКЦ. С помощью регуляторов CS1:G и CS2:G устанавливаются молярные расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно. При нажатии на кнопку СТАРТ запускается процесс минимизации, который определяет минимальную длину теплообменника 128,9 м., при которой будут наблюдаться равные температуры теплоносителей на выходе аппарата.

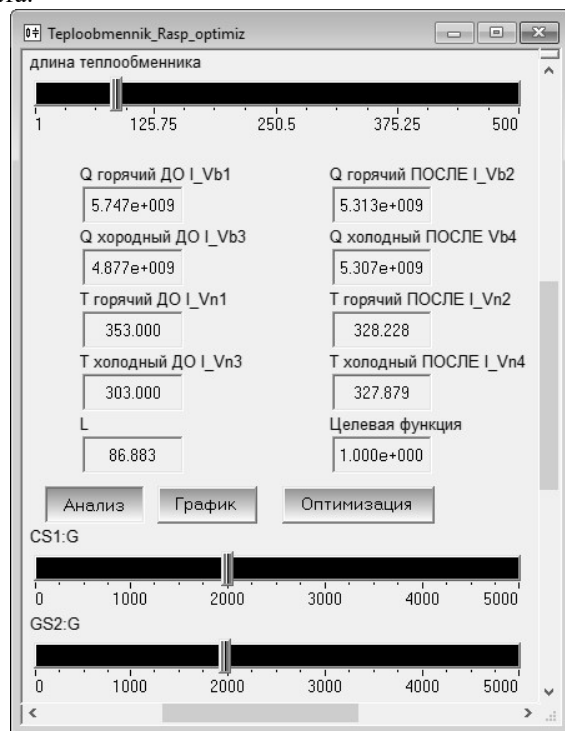


Рисунок 5.3 – Лицевая панель решения задачи определения минимальной длины теплообменного аппарата

Изменяя объемные расходы горячего CS1:G и холодного CS2:G теплоносителей при их заданных температурах, определить минимальную

длину теплообменника, при которой теплоносители на его выходе будут иметь одинаковую температуру. Результаты исследования представить в виде таблицы 5.1.

Таблица 5.1

Зависимость длины теплообменника от расходов теплоносителей на входах теплообменника

Объемный расход горячего теплоносителя CS1:G	Объемный расход холодного теплоносителя CS2:G	Минимальная длина теплообменника L_{min}
1000	1000	
	3000	
	5000	
3000	1000	
	3000	
	5000	
5000	1000	
	3000	
	5000	

5. Содержание отчета

5.1. Схема виртуального стенда для автоматизированного решения задачи функционального проектирования

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Данные расчета минимальной длины теплообменного аппарата при различных объемных расходах теплоносителей на его входе

5.4. Заключение о зависимости длины теплообменного аппарата от объемных расходов теплоносителей на его входах

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2 кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

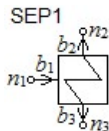
Лабораторная работа 6. Определение точки росы газа путем проведения многовариантного анализа в многоуровневой компьютерной модели

1. Цель работы

Разработка многоуровневой компьютерной модели для определения точки росы газа по углеводородам путём автоматизированного решения задачи многовариантного анализа.

2. Указания к выполнению работы

Поступающий на установку комплексной подготовки газа (УКПГ) добытый природный газ содержит в себе пластовую воду, различные механические примеси, а также различные компоненты (вещества), находящиеся в газовой или жидкой фазе. Для разделения газовой смеси на различные компоненты потока она проходит последовательно несколько ступеней сепарации: сепаратор первой ступени сепарации (С-1), промежуточный (С-4) и низкотемпературный (С-2). Перед сепараторами С-4 и С-2 газ охлаждается в теплообменниках.



Для описания модели сепарации газа при различных давлениях и температурах используется компонент «Сепаратор», представленный на рисунке 6.1, который обладает следующими связями:

– $S_1 = (b_1 \eta^- n_1) \rightarrow \{ \{ P_m, G_m \}, \{ T_m, Q_m \}, \{ C_{in} \} \}$ – входная связь, по которой газожидкостная смесь под определенным давлением P_m и температурой T_m поступает в сепаратор;

– $S_2 = (b_2 \eta^+ n_2) \rightarrow \{ \{ P_G, G_G \}, \{ T_G, Q_G \}, \{ C_G \} \}$ – выходная связь, предназначенная для вывода газа из сепаратора под давлением P_G температурой T_G . Компонентный состав газа представлен вектором концентраций веществ C_G ;

$S_3 = (b_3 \eta^+ n_3) \rightarrow \{ \{ P_L, G_L \}, \{ T_L, Q_L \}, \{ C_L \} \}$ – выходная связь, по которой из сепаратора отводится жидкость под давлением P_L , которая обладает температурой T_L . Вектор C_L содержит концентрации веществ, составляющих данный поток.

Математическая модель компонента «Сепаратор» представляет систему уравнений относительно переменных его связей вида

$$\begin{aligned}
P_G - P_{in} &= 0 \\
P_L - P_{in} &= 0 \\
G_{in} - G_G - G_L &= 0 \\
e \cdot G_G - G_L &= 0 \\
T_G - T_{in} &= 0 \\
T_L - T_{in} &= 0 \\
Q_G - Q_{in} &= 0 \\
Q_L - Q_{in} &= 0 \\
C_{in_i} - e \cdot C_{G_i} - (1-e) \cdot C_{L_i} &= 0 \\
C_{G_i} - K_i \cdot C_{L_i} &= 0
\end{aligned}
, \tag{6.1}$$

где $i = \overline{1, CF}$, CF – количество компонент (веществ) во входном потоке сепаратора; e – доля пара, рассчитываемая методом золотого сечения путем минимизации целевой функции вида

$$F(e) = \sum_{i=1}^{CF} C_{in_i} \cdot \frac{K_i - 1}{1 + e \cdot (K_i - 1)}, \tag{6.2}$$

K_i – константы фазового равновесия системы «Пар-жидкость», рассчитываемые путем решения уравнения Соава-Редлиха-Квонга.

Актуальной проблемой при транспортировке газа по трубопроводам является проблема уменьшения гидратообразования в газотранспортной системе. Для снижения образования гидратов и поддержки пропускной способности газ в установках комплексной подготовки газа проходит ряд ступеней сепарации, а также осушку газа в абсорберах.

Наибольший эффект от сепарации газа может быть получен в случае, когда газ на входе сепаратора имеет температуру, соответствующую точке росы по углеводородам. При температуре точки росы, выполняется соотношение

$$\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{K_i} = 1, \tag{6.3}$$

где y_i – мольные доли всех компонентов в паровой фазе; K_i – константы фазового равновесия, определяемые путем численного решения уравнений Соава-Редлиха-Квонга.

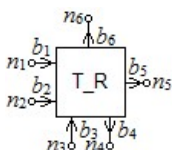


Рисунок 6.2.
Компонент
«Определение
точки росы»

Для определения температуры точки росы по углеводородам на основе обобщенного компонента БОР и компонентов многовариантного анализа, в рамках языка МАК разработан компонент «Определение точки росы», представленный на рисунке 6.2. Его связями являются:

– $S_1 = (b_1 \eta^- n_1) \rightarrow \{K\}$ – связь для получения

вектора коэффициентов фазового равновесия всех компонент, действующих в рассматриваемой ХТС;

– $S_2 = (b_2 \eta^- n_2) \rightarrow \{C\}$ – связь для получения

вектора концентраций компонент, составляющих многокомпонентные потоки рассматриваемой ХТС;

– $S_3 = (b_3 \eta^- n_3) \rightarrow \{Start\}$ – связь для получения сигнала о начале по-

иска температуры точки росы;

– $S_4 = (b_4 \eta^+ n_4) \rightarrow \{Analiz\}$ – связь для передачи сигнала о проведе-

нии очередной итерации анализа модели исследуемой ХТС;

– $S_5 = (b_5 \eta^+ n_5) \rightarrow \{T_T\}$ – связь для передачи текущей температуры

соответствующему источнику многокомпонентного потока, установленного на входе рассматриваемого аппарата ХТС;

– $S_6 = (b_6 \eta^+ n_6) \rightarrow \{T_R\}$ – связь для отправки найденной температуры

точки росы другим компонентам для использования найденного результата.

3. Содержание работы

3.1 Сборка виртуального стенда для решения задач многовариантного анализа

3.2 Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3 Проведение эксперимента по определению точки росы газа при различных значениях его давления и температуры на входе сепаратора

3.4 Вывод по изменению точки росы газа при изменении давления и температуры газожидкостной смеси на входе сепаратора

4. Порядок проведения работы

На объектном уровне многоуровневой компьютерной модели формируется компьютерная модель секции низкотемпературной сепарации природного газа, представленная на рисунке 6.3. В таблице 6.1 приведено назначение измерительных компонентов, включенных в эту модель. наименования веществ, концентрации которых измеряются, должны быть указаны в параметрах соответствующего измерительного компонента.

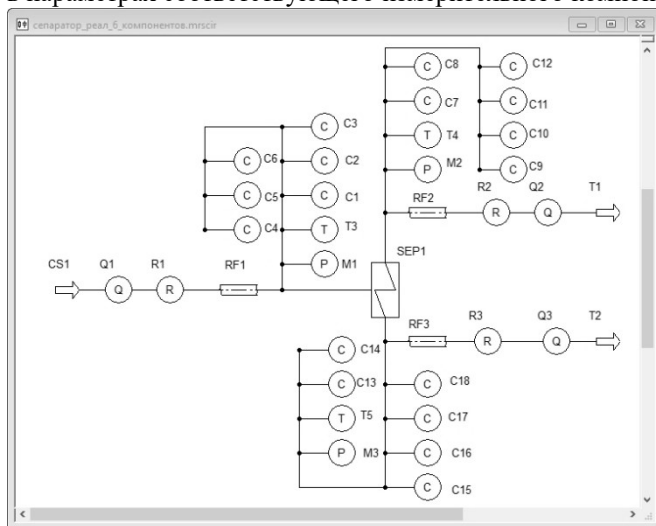


Рисунок 6.3 – Компьютерная модель секции низкотемпературной сепарации природного газа

Таблица 6.1

Назначение измерителей компьютерной модели секции низкотемпературной сепарации газожидкостной смеси

Физическая величина	Вход	Выход газовой фазы	Выход жидкой фазы
1	2	3	4
Давление, Па	M1	M2	M3
Молярный расход вещества, моль/с	R1	R2	R3
Температура, К	T1	T2	T3
Тепловой поток, Дж/с	Q1	Q2	Q3
Концентрация метана	C1	C7	C13

Окончание табл. 6.1

1	2	3	4
Концентрация этана	C2	C8	C14
Концентрация пропана	C3	C9	C15
Концентрация изобутана	C4	C10	C16
Концентрация н-бутана	C5	C11	C17
Концентрация азота	C6	C12	C18

В параметрах компонента «Определение точки росы» задается начальная температура, от которой осуществляется старт многовариантного анализа по температуре. Алгоритм работы компонента начинается в момент, когда по связи S_3 придет сообщение. Текущее значение температуры передается источнику многокомпонентного потока или другому компоненту, задающему температуру потока, по связи S_5 . Сигнал о проведении очередной итерации анализа посылается компонентам одновариантного анализа по связи S_4 . Когда компонент по связям S_1 и S_2 получает вектора коэффициентов фазового равновесия и концентраций всех веществ в исследуемой ХТС, осуществляется расчет суммы, указанной в левой части соотношения (6.3). Если оно выполняется, то осуществляется повышение температуры до значения, при котором это соотношение станет меньше 1. Когда соотношение (6.3) не выполняется, что характерно для температур, превышающих точку росы по углеводородам, осуществляется понижение температуры и ее передача соответствующему источнику через связь S_5 . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока соотношение (6.3) не будет выполняться.

Максимальная температура, при которой выполняется соотношение (6.3), будет являться точкой росы T_{TR} по углеводородам. В качестве результата полученное значение T_{TR} будет передано по связи S_6 .

Компонентная цепь секции низкотемпературной сепарации природного газа приведена на рисунке

На основе КЦ секции низкотемпературной сепарации природного газа, представленной на рисунке 6.3, и приведенного на рисунке 6.2 компонента «Определение точки росы» разработана алгоритмическая компонентная цепь определения температуры точки росы газа при заданном его давлении на входе сепаратора. Она представлена на рисунке 6.4.

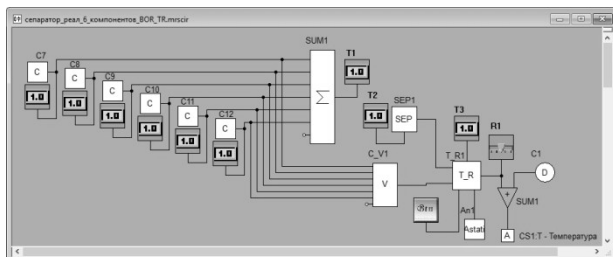


Рисунок 6.4 – Алгоритмическая компонентная цепь определения точки росы газа по углеводородам

Компонентом-сумматором SUM1 осуществляется контроль суммы всех концентраций на выходе паровой фазы сепаратора. С помощью конструктора вектора C_V1 формируется вектор концентраций веществ, которые передаются с объектного уровня многоуровневой КЦ на её логический уровень компонентами C7-C12. Сформированный вектор передается на компонент T_R1, осуществляющий поиск точки росы при заданном давлении вещественного потока на выходе сепаратора. Найденное значение температуры точки росы в результате многовариантного анализа при изменении температуры T источника CS1 передается на цифровое табло T3.

При решении данной задачи на визуальном уровне многоуровневой КЦ сформирована панель визуализации и управления, представленная на рисунке 6.5.

Исследовать зависимость точки росы газожидкостной смеси при изменении её давления на входе сепаратора. Результаты представить в виде таблицы 6.2 и сделать выводы.

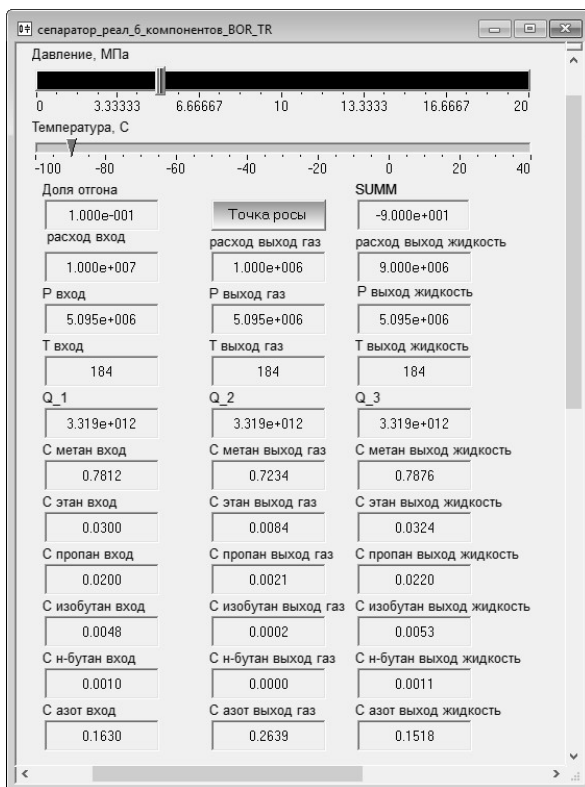


Рисунок 6.5 – Панель визуализации и интерактивного управления многоуровневой КМ определения температуры точки росы

Таблица 6.2
Зависимость точки росы газожидкостной смеси от её давления на входе сепаратора

Давление газожидкостной смеси на входе сепаратора, МПа	Точка росы газа по углеводородам, К
1000	
2000	
3000	
4000	
5000	

5. Содержание отчета

5.1. Схема виртуального стенда для экспериментального определения точки росы газа по углеводородам

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Данные расчета точки росы газа по углеводородам, представленные в виде таблицы 6.2.

5.4. График зависимости точки росы газа по углеводородам от давления газожидкостной смеси на входе сепаратора

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Кафаров В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем. Учебник для вузов. / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
2. Акберов Р.Р. Особенности расчета фазового равновесия пар-жидкость при использовании уравнения Соава-Редлиха-Квонга // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – Т. 45. – № 3. – С. 329-335.
3. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа 7. Формирование многоуровневой компонентной цепи минимизации расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа

1. Цель работы

На основе методов оптимизации определять управляющие воздействия, отвечающие требованиям эффективности функционирования аппаратов химической промышленности.

2. Указания к выполнению работы

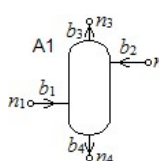


Рисунок 7.1 –
Компонент
«Абсорбер»

Для осушки природного газа от паров влаги в технологическом процессе предприятий газовой промышленности нашли широкое применение абсорберы. Они являются аппаратами химической технологии, в которых осушка газа производится путем массообмена абсорбируемых компонент между газом и жидким абсорбентом (ингибитором). В его качестве могут использоваться метанол, диэтиленгликоль или другие жидкие вещества.

Компонент «Абсорбер», представленный на рисунке 7.1, имеет следующие физико-химические связи:

– $S_1 = (n_1 \eta^- b_1) \rightarrow \{\{P_1, G_1\}, \{T_1, Q_1\}, \{C_1\}\}$ – связь, по которой в абсорбер поступает подлежащий осушке газ;

– $S_2 = (b_2 \eta^- n_2) \rightarrow \{\{P_2, G_2\}, \{T_2, Q_2\}, \{C_2\}\}$ – связь, по которой в абсорбер подается ингибитор;

– $S_3 = (b_3 \eta^+ n_3) \rightarrow \{\{P_3, G_3\}, \{T_3, Q_3\}, \{C_3\}\}$ – связь, предназначенная для вывода осушенного газа из абсорбера;

– $S_4 = (b_4 \eta^+ n_4) \rightarrow \{\{P_4, G_4\}, \{T_4, Q_4\}, \{C_4\}\}$ – связь, через которую осуществляется вывод из абсорбера насыщенного влагой ингибитора.

Математическим описанием используемых в абсорберах процессов являются следующие уравнения:

– уравнение массопередачи

$$G = \sum_{i=1}^{N_F} \min(\beta_{iy} (y_i - y_{ip}^r) \cdot F, \beta_{ix} (x_{ip}^r - x_i) \cdot F), \quad (7.1)$$

где β_{iy}, β_{ix} – коэффициенты массопередачи в отдающей (газовой) и принимающей (жидкой) фазах, выражающие количество вещества, подводимого к единице площади раздела фаз в единицу времени при единичной движущей силе процесса; y_i, x_i – содержание i -го компонента соответ-

ственно в газовой и жидкой фазах; $y_{ip}^\Gamma, x_{ip}^\Gamma$ – равновесные концентрации на границе раздела фаз; F – площадь межфазной поверхности; N_F – количество компонентов-веществ в рассматриваемой ХТС, подлежащих абсорбции.

– уравнения материального баланса абсорбции, выраженного равенством количеств веществ обеих фаз, поступающих в абсорбер и выходящих из него:

$$\begin{aligned} G_1 - G_3 &= G \\ G_4 - G_2 &= G \quad ; \\ P_1 + P_2 - P_3 - P_4 &= 0 \end{aligned} \quad (7.2)$$

– уравнения теплового баланса абсорбции, составленные на основании того, что процесс абсорбции протекает без подвода и отвода сторонней тепловой энергии

$$\begin{aligned} G_1 \cdot Q_1 + G_2 \cdot Q_2 - G_3 \cdot Q_3 - G_4 \cdot Q_4 &= 0 \\ T_1 \cdot Q_1 + T_2 \cdot Q_2 - T_3 \cdot Q_3 - T_4 \cdot Q_4 &= 0 \quad ; \end{aligned} \quad (7.3)$$

– уравнения концентраций на выходе газовой и жидкой фаз абсорбера

$$\begin{aligned} C_{3i} - \frac{G_1 \cdot C_{1i} - G_{Ci}}{G_1 - G} &= 0 \\ C_{4i} - \frac{G_2 \cdot C_{2i} + G_{Ci}}{G_2 + G} &= 0 \end{aligned} \quad (7.4)$$

Уравнения (7.1)–(7.4) лежат в основе реализации математической модели компонента «Абсорбер».

При эксплуатации абсорберов на газовых и газоконденсатных месторождениях актуальной проблемой является задача оптимального расхода ингибитора.

3. Содержание работы

3.1 Сборка многоуровневой компьютерной модели для определения оптимального расхода ингибитора

3.2 Определение содержания каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

3.3 Формирование целевой функции и метода оптимизации для определения оптимального расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа

3.4 Проведение эксперимента по нахождению минимального расхода ингибитора при различных значениях содержания воды в газе на входе абсорбера

3.5 Вывод по изменению оптимального расхода ингибитора при различных параметрах неосущенного газа

4. Порядок выполнения работы

Сформируем целевую функцию. Требуется определить минимальный расход ингибитора на входе абсорбера, при котором концентрация воды в газовой фазе на его выходе будет меньше или равна некоторой заданного (минимального) значения

$$\begin{aligned} C_{H_2O}^{G-out} &\leq C_{\min} \\ G^{G-in} &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (7.5)$$

Таким образом, данная задача может быть сведена к задаче одномерной оптимизации с целевой функцией вида

$$F(G^{G-in}) = (C_{H_2O}^{G-out} - C_{\min})^2 \rightarrow \min \quad (7.6)$$

при увеличении расхода ингибитора на входе жидкой фазы абсорбера. Как только целевая функция достигнет своего минимума, будет найдено минимальное значение ингибитора G^{G-in} , при котором концентрация воды на выходе газовой фазы абсорбера будет иметь значение C_{\min} .

Решение поставленной задачи может быть осуществлено с помощью многоуровневой КЦ.

Пусть на вход газовой фазы абсорбера подается сырой очищенный от механических примесей газ с содержанием воды $C_{H_2O}^{C-in}$ под давлением 9.5 МПа и молярным расходом 1500 моль/с. Необходимо определить минимальный расход ингибитора на входе жидкой фазы абсорбера, при котором газ на выходе будет иметь заданную минимальную концентрацию воды C_{\min} . Для решения данной задачи сформирована многоуровневая КЦ, на объектном уровне которой, представленном на рисунке 7.2, располагается компонентная цепь секции абсорбционной осушки природного газа. Физический смысл измерительных компонентов, осуществляющих передачу результатов моделирования с объектного уровня многоуровневой КЦ на её логический уровень, приведен в таблице 7.1.

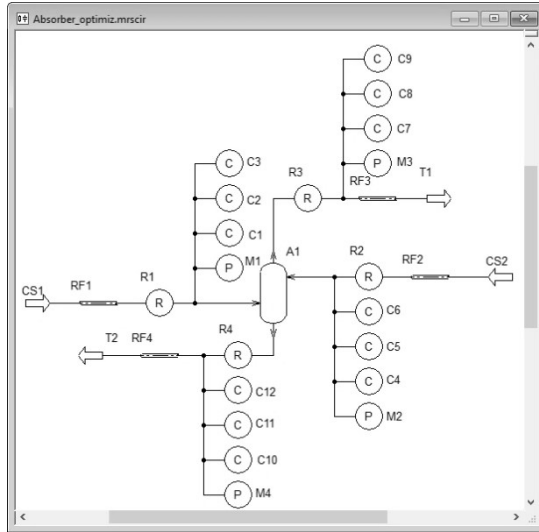


Рисунок 7.2 – Объектный уровень многоуровневой КМ минимизации расхода ингибитора

На основе передаваемых значений на логическом уровне МКЦ сформирована алгоритмическая подцепь минимизации расхода ингибитора на входе абсорбера, представленная на рисунке 7.3.

Таблица 7.1

Физический смысл измерительных компонентов

Физическая величина	Вход газовой фазы	Вход жидкой фазы	Выход газовой фазы	Выход жидкой фазы
Давление	M1	M2	M3	M4
Расход	R1	R2	R3	R4
Концентрация газа	C1	C4	C7	C10
Концентрация воды	C2	C5	C8	C11
Концентрация ингибитора	C3	C6	C9	C12

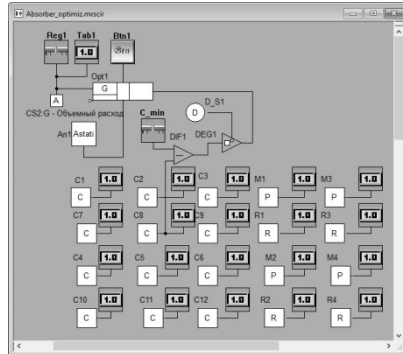


Рисунок 7.3 – Алгоритмическая компонентная цепь минимизации расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа

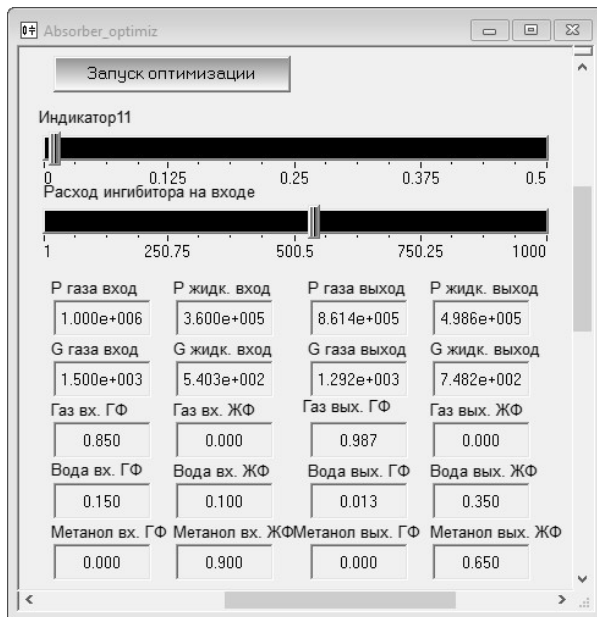


Рисунок 7.4 – Результаты решения задачи минимизации расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа на визуальном уровне многоуровневой КЦ

Процесс оптимизации запускается по нажатию на кнопку Btn1 и осуществляется компонентом-оптимизатором Opt1. Целевая функция (7.6) сформирована с помощью компонентов DIF1 и DEG1, который возводит разность между требуемой минимальной C_{min} и текущей концентрацией воды на выходе газовой фазы абсорбера, передаваемой с объектного на логический уровень многоуровневой КЦ измерителем концентраций C8. В ходе работы компонента-оптимизатора текущее значение расхода ингибитора на входе абсорбера передается на визуальный уровень с помощью регулятора Reg1 и отображается цифровым табло Tab1.

На рисунке 7.4 представлен визуальный уровень многоуровневой КЦ минимизации расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа.

На основе сформированной многоуровневой компонентной цепи исследуйте зависимость расхода ингибитора при различных концентрациях воды в газе на входе абсорбера. По результатам исследования заполните таблицу 7.2

Таблица 7.2

Зависимость расхода ингибитора от концентраций воды в газе

Концентрация газа на входе абсорбера	Концентрация воды на входе абсорбера	Объемный расход ингибитора
0,95	0,05	
0,9	0,1	
0,85	0,15	
0,8	0,2	
0,75	0,25	
0,7	0,3	

По результатам заполнения таблицы построить график зависимости объемного расхода ингибитора от концентрации воды в газе на входе абсорбера и сделать вывод.

5. Содержание отчета

5.1 Схема виртуального стенда для экспериментального определения оптимального расхода ингибитора

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели

5.3. Результаты исследования зависимости минимального объемного расхода ингибитора от концентрации воды в газе, представленные в виде таблицы 7.2

5.4. График зависимости минимального объемного расхода ингибитора от концентрации воды в газе

5.5. Выводы по работе

Литература

1. Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г. АСУ ТП промыслов газовконденсатного месторождения Крайнего Севера. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 231 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

Лабораторная работа № 8. Построение компьютерных моделей виртуальных приборов

1. Цель работы

Исследование на практике процедуры построения и тестирование виртуального прибора на основе многоуровневой компьютерной модели.

2. Указания к выполнению работы

Любой виртуальный прибор генераторного или измерительного типа, предназначенный для проведения реального (натурного) эксперимента или максимального приближения виртуального (вычислительного) эксперимента к натурному, в формате МКЦ формально можно представить в виде совокупности трех подцепей

$$C^{ВП} = (C_O^{ВП} \cup C_L^{ВП} \cup C_V^{ВП}), \quad (8.1)$$

где $C_O^{ВП}$ – компонентная цепь объектного уровня ВП, на котором формируется интерфейс его подключения к исследуемому реальному объекту и (или) его КМ; $C_L^{ВП}$ – алгоритмическая КЦ виртуального прибора, включающая алгоритмы его функционирования; $C_V^{ВП} = \{K_V^{ВП}\}$ – совокупность визуальных компонентов, составляющих лицевую панель виртуального прибора.

Из представленных совокупностей компонентов может быть сформирован любой прибор генераторного или измерительного типа, предназначенный для исследования технических объектов и (или) их компьютерных моделей, представленных подцепями объектного уровня МКЦ в формате языка моделирования технических и технологических систем. Разработка прибора осуществляется по стандартному алгоритму.

При формировании виртуального прибора в алгоритмической КЦ, описывающей алгоритмы функционирования ВП, происходит обмен информацией различных типовых технических и технологических системданных. У визуальных компонентов может быть множество атрибутов. Для изменения их значений не целесообразно выносить соответствующие узлы к изображению компонента на логическом уровне многоуровневой КЦ ВП.

Для варьирования значения некоторого атрибута визуального компонента множества $K_V^{ВП}$, используется компонент-атрибут, представленный на рисунке



Рисунок 8.1 – Возможность изменения атрибута компонента

- а) отображение компонента на визуальном слое;
- б) отображение компонента на логическом слое;
- в) атрибутный компонент визуального компонента на логическом слое

На рисунке 8.1 показан пример изменения максимального значения (смотри рисунок 8.1, в) компонента «Стрелочник», представленный на рисунках 8.1, а и б. При получении сообщения, тип данных которого совпадает с типом данных атрибута «Максимальное значение шкалы регулятора», производится изменение значения соответствующего атрибута компонента «Стрелочник».

Последовательность действий пользователя при формировании виртуального прибора. Виртуальный прибор генераторного или измерительного типа формируется пользователем из визуальных компонентов, составляющих лицевую панель прибора, а также из логических компонентов, реализующих сценарии его функционирования на логическом уровне его КЦ. Помимо этого, для проведения виртуальных экспериментов формируется подцепь его сопряжения с исследуемой КЦ ХТС на объектном уровне. При исследовании реального объекта в сценарии функционирования прибора добавляются компоненты сопряжения с аппаратно-программными комплексами, например, функционирующими на базе языка управления механизмами X-Robot.

Последовательность действий пользователя по формированию виртуального прибора, представленная на рисунке 8.2, состоит из следующих этапов:

На этапе 1 *Составления технического задания на прибор* выявляются задачи, на решение которых направлен формируемый ВП, а также производится выявление его параметров, подлежащих варьированию с помощью компонентов-регуляторов на лицевой панели прибора, их интервалов варьирования и единиц измерения.



Рисунок 8.2 – Последовательность действий пользователя по формированию виртуального прибора

На этапе 2 на основании сформированного технического задания на прибор производится **Формирование лицевой панели прибора**. Оно заключается в выборе необходимых визуальных компонентов и их параметров. На данном этапе производится задание геометрических размеров компонентов на визуальном уровне, шрифтов отображения числовой и строковой информации, а также взаимное расположение визуальных компонентов, составляющих лицевую панель прибора.

На этапе 3 после того, как сформирована лицевая панель виртуального прибора, ее визуальные компоненты будут иметь свои отображения на логическом уровне многоуровневой КЦ ВП. Путем добавления на этот уровень необходимых логических компонентов и их соединения в соот-

ветствующие алгоритмические подцепи, осуществляющих преобразование входных данных в выходные, производится **формирование сценариев работы прибора**.

Формирование интерфейсных связей прибора с реальным объектом или его моделью производится путем оформления данного прибора в макрокомпонент. Для этого применяется специальный компонент «Интерфейс», представленный на рисунке 8.3.

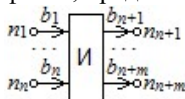


Рисунок 8.3 – Компонент «Интерфейс» для создания виртуальных приборов в виде макрокомпонентов

Его задачами являются формирование необходимых связей прибора с другими компонентами, а также задание параметров для создания лицевой панели прибора в виде отдельного окна. Любая компонентная цепь, включающая в себя компонент «Интерфейс», может быть сохранена в библиотеку моделей компонентов как макрокомпонент ВП. В этом случае он будет обладать специальным интерфейсным окном, содержащем в себе лицевую панель прибора, а также в виде многоуровневой подцепи входит в МКЦ исследуемой СТЭС.

3. Содержание работы

3.1. Составление технического задания на виртуальный прибор

3.2. Формирование лицевой панели прибора

3.3. Формирование сценариев работы прибора

3.4. Формирование интерфейсных связей прибора с исследуемой моделью

3.5. Тестирование виртуального прибора

4. Порядок выполнения работы

4.1 Составление технического задания на прибор «Мультиметр».

Мультиметр – это виртуальный измерительный прибор, предназначенный для измерения текущих (для постоянного тока) и действующих (для переменного тока) значений напряжения и тока, активного сопротивления и активной мощности. Создаваемый прибор должен обладать следующими характеристиками: диапазон измерения напряжения – 1 мкВ – 1 МВ; диапазон измерения тока от 1 мкА до 1 МА; диапазон измерения активного сопротивления от 1 пОм до 1 ТОм; диапазон измерения активной мощности от 1 пВт до 1 ТВт.

3.2 Формирование лицевой панели прибора. Лицевая панель ВП «Мультиметр», представленная на рисунке 8.4, включает следующие элементы:

- *Цифровое табло «Значение»*, выводящее необходимое измеряемое или рассчитываемое на основе измерений значение;

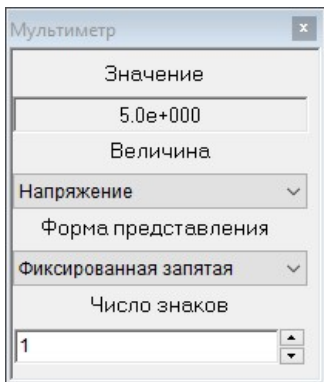


Рисунок 8.4 – Лицевая панель виртуального прибора «Мультиметр»

- *Комбинированный список «Величина»*, позволяющий выбрать необходимую для измерения и визуализации характеристику исследуемого участка электрической цепи. К таким величинам относятся: напряжение, ток, сопротивление, мощность.

- *Комбинированный список «Форма представления»*, позволяющий выбрать форму представления вещественного числа: с фиксированной запятой или с плавающей запятой;

- *цифровое число со спином «Число знаков»*, позволяет изменять количество знаков после запятой в визуализируемом значении.

3.3 Формирование сценариев работы прибора осуществляется с применением компонентов языка моделирования алгоритмических конструкций и измерительных компонентов языка моделирования ХТС,

осуществляющих первичные измерения текущих значений напряжения и тока.

В представленной на рисунке 8.5 алгоритмической КЦ функционирования ВП «Мультиметр» используются следующие компоненты:

- *Вольтметр V1 и амперметр A1* используются для измерения напряжения U_1 и тока ветви I_1 соответственно ветви, в которую включен виртуальный прибор

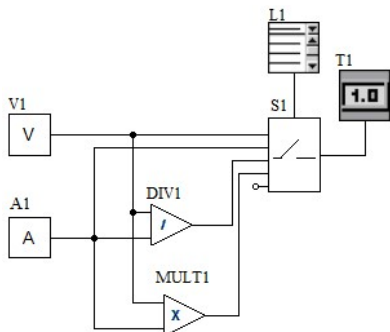


Рисунок 8.5 – Алгоритмическая компонентная цепь функционирования ВП «Мультиметр»

«Мультиметр» для исследования ее характеристик;

- *Деление DIV1* применяется для определения сопротивления

$$R1 = \frac{U1}{I1} \quad (8.2)$$

исследуемой ветви электрической цепи, с которую включен ВП;

– Умножение *MULT1* позволяет вычислить мощность, потребляемую исследуемой с помощью ВП «Мультиметр» ветвью

$$P1 = U1 \cdot I1 ; \quad (8.3)$$

– С помощью *комбинированного списка L1* пользователем выбирается измеряемая характеристика обозначенной ветви электрической цепи. Каждой характеристике соответствует определенный порядковый номер: 0 – напряжение; 1- ток; 2 – сопротивление; 3 – мощность;

– *Алгоритмический ключ S1* осуществляет передачу на свой единственный выход значения, пришедшего на информационный вход, номер которого был передан последним комбинированным списком *L1*;

– *Цифровое табло T1* предназначено для визуализации полученного значения на лицевой панели виртуального прибора.



T1: формат числа

Рисунок 8.6 – Установка формата числа

Для настройки параметров цифрового табло *T1*, предназначенного для вывода результата на лицевую панель прибора, используются:

– *комбинированный список L2*, позволяющий выбрать одну из форм представления вещественного числа: 0 – фиксированная запятая, 1 – плавающая запятая. Его выход подключен к компоненту-атрибуту *T1:формат числа*. Соответствующая алгоритмическая КЦ приведена на рисунке 8.6.



T1: Количество знаков после запятой

Рисунок 8.7 – Установка количества знаков после запятой

– *цифровое табло со спином T2* предназначено для установки количества знаков после запятой в визуализируемом результате.

Установка соответствующего значения в качестве атрибута цифрового табло *T1* производится с помощью алгоритмической КЦ, представленной на рисунке 8.7.

3.4 Формирование интерфейсных связей с исследуемой моделью осуществляется на объектном уровне многоуровневой КЦ ВП. Её компонентная подцепь объектного уровня, полученная в результате установки связей измерительных компонентов – вольтметра *V1* и амперметра *A1* с компонентом Интерфейс, представленном на рисунке, приведена на рисунке 8.8.

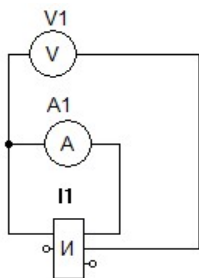


Рисунок 8.8 –
Компонентная цепь объектно-
го уровня ВП «Мультиметр»

3.5 Для тестирования прибора сформирована КЦ электрической цепи постоянного тока, представленная на рисунке 8.9. С помощью виртуального прибора «Мультиметр» измерению подлежат все характеристики сопротивления *R2*. Результаты измерения представлены на рисунках 8.10,а-г.

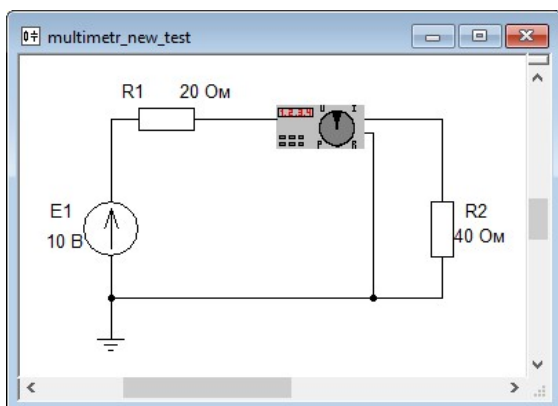
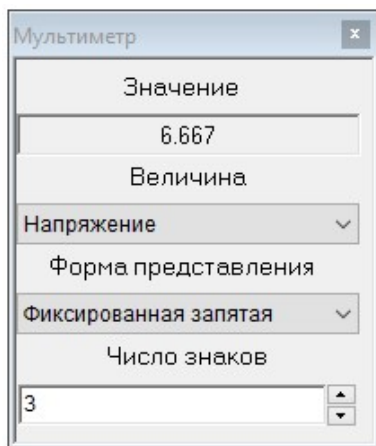
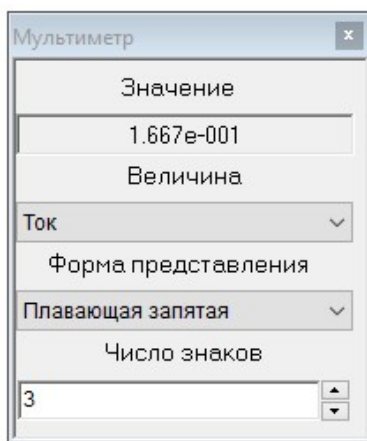


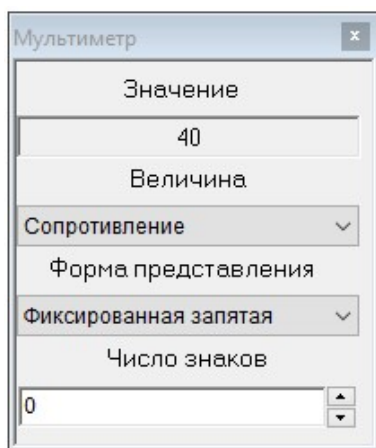
Рисунок 8.9 – Компьютерная модель электрической цепи для тестирования виртуального прибора «Мультиметр»



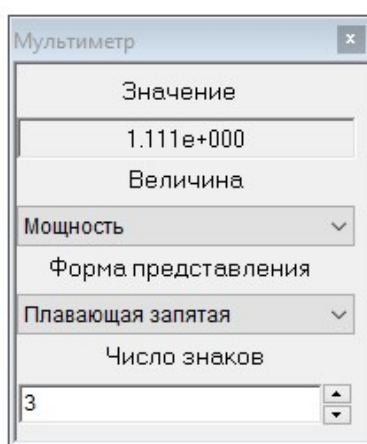
а)



б)



в)



г)

Рисунок 8.10 – Тестирование виртуального прибора «Мультиметр»

- а) в режиме измерения напряжения;
- б) в режиме измерения тока;
- в) в режиме измерения сопротивления;
- г) в режиме измерения мощности

Исследовать характеристики делителя напряжения, представленного на рисунке 8.9 и заполнить таблицу 8.1.

Таблица 8.1

Исследование делителя напряжения с помощью виртуального прибора «Мультиметр»

Сопротивление R , Ом	Напряжение U , В	Ток I , А	Мощность P , Вт
10			
20			
30			
40			
50			

5. Содержание отчета

5.1. Схема виртуального стенда для проведения эксперимента

5.2. Скриншоты каждого слоя многоуровневой компьютерной модели прибора

5.3. Выходные данные исследования построенного прибора, представленные в виде таблицы 8.1.

Литература

1. СВИП – система виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. – Т.: В-Спектр, 2014. – 216 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Компьютерное моделирование химико-технологических систем. – Изд-во ТГУ, 2017. – 352 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.М. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 2000. – 575 с.
2. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. – 352 с.
3. Вересов Г.П. Электропитание бытовой аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1983. – 128 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.
5. Востриков А.С. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.
6. Кафаров В.В. Системный анализ химической технологии. Топологический анализ формализации / В.В. Кафаров, И.Н. Дорофов. – М.: Наука, 1979. – 304 с.
7. Кафаров В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем. Учебник для вузов. / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
8. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2 кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
9. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2 кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
10. Кафаров В.В. Основы построения операционных систем в химической технологии / В.В. Кафаров, В.Н. Ветохин. – М.: Наука, 1980. – 430 с.
11. МАРС – среда моделирования технических устройств и систем. Монография / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.
12. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Истигечева Е.В., Клепак И.Я. Интеллектуализация управления технологическими процессами на углеводородных месторождениях. – Томск: В-Спектр, 2012. – 212 с.
13. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2 кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 400 с.

14. Востриков А.С. Теория автоматического управления: Учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высш. шк., 2004. – 365 с.

15. Кафаров В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем. Учебник для вузов. / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 432.

16. Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г. АСУ ТП промыслов газовконденсатного месторождения Крайнего Севера. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 231 с.

17. СВИП – система виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. – Т.: В-Спектр, 2014. – 216 с.