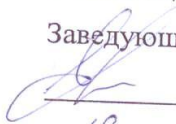


Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий  
Кафедра систем автоматики, автоматизированного  
управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой





 С.В. Ченцов

« 19 » 06 2017 г.

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

27.03.04 Управление в технических системах

### АВТОМАТИЗАЦИЯ БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Руководитель		<u>16.06.2017</u> г.	И.В. Солопко ст. препод. каф. СААУП
Выпускник		<u>16.06.2017</u> г.	А.А. Сендажы
Консультант		<u>19.06.2017</u> г.	С.В. Ченцов профессор, д.т.н. каф. СААУП
Нормоконтролер		<u>16.06.2017</u> г.	Т.А. Грудинова

Красноярск 2017

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа (ВКР) на тему «Автоматизация бумажного производства» содержит 54 страниц текстового документа, 33 иллюстрации, 16 таблиц, 11 формул, 20 использованных источников,

**БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНАЯ МАШИНА, СУШИЛЬНАЯ ЧАСТЬ, САУ, БУМАЖНОЕ ПОЛОТНО, СИСТЕМА, МОДЕЛЬ**

Объектом автоматизации является сушильная часть бумагоделательной машины.

Цель работы: построить математическую модель на основании существующей системы автоматизации сушки бумажного полотна в сушильной части БДМ за счет улучшения временных и переходных характеристик регулирующих элементов для получения бумаги равномерной влажности.

Актуальность работы заключается в том, что контактная сушка является наиболее распространенным методом, но менее изученным. Работа систем управления контактной сушкой должна обеспечивать наиболее низкое соотношение расхода пара и количества удаленной воды из бумаги, вследствие предоставления возможности более гибкого снижения погрешности регулирования, и улучшения временных и частотных характеристик регулирующих элементов.

В ходе работе рассмотрена автоматизация бумажного производства, в частности автоматизация сушильной части бумагоделательной машины. Рассмотрена модель «черного ящика», проведена декомпозиция системы. Построена модель в математическом приложении Matlab, рассчитан ПИД-регулятор, с помощью которого были исследованы временные характеристики САУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Описание технологии бумажного производства .....	6
1.1 Исследование технологического процесса изготовления бумаги .....	6
1.2 Техническая характеристика сушильной части БДМ.....	9
1.3 Технологический процесс сушки бумаги и основное оборудование .....	13
1.4 Выводы по 2 главе .....	16
2 Автоматизация процесса сушки .....	17
2.1 Анализ САУ основного оборудования сушильной части БДМ.....	17
2.2 Описание функциональной схемы автоматизации .....	18
2.3 Технические средства автоматизации .....	20
2.4 Вывод по 2 главе .....	37
3 Моделирование автоматизации сушильной части .....	38
3.1 Представление модели в виде черного ящика .....	38
3.2 Модель состава системы .....	40
3.3 Декомпозиция модели черного ящика .....	41
3.4 Построение модели системы в пакете MatLab .....	44
3.5 Описание динамических характеристик САУ: .....	44
3.6 Синтез САУ .....	47
3.6.1. Расчет ПИД-регулятора.....	47
3.7 Вывод по 3 главе .....	52
Заключение .....	53
Список использованных источников .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированная система управления технологическим процессом - это система для выработки и реализации управляющих воздействий на объект управления в соответствии с принятым критерием управления. Автоматизированная предполагается в управлении участие и ЭВМ и оператора. Необходимость участия человека в процессе управления обусловлена недостаточной гибкостью и надежностью автоматической системы. Возникновение непредвиденных ситуаций в объекте управления или случайные сбои системы могут привести к переводу объекта управления в аварийный режим, оператор в данном случае выполняет функции контроля действий автоматической системы. Кроме того, необходимость участия человека в управлении технологическим процессом обусловлена сложностью в отдельных случаях стыковки ЭВМ с автоматическими регуляторами, а также экономическими соображениями.

Технологический процесс производства бумаги представляет собой сложный многостадийный процесс, осуществляемый с помощью разнообразных по конструкции, принципам действия и протекающих в них процессам аппаратов непрерывного действия. Этим определяется сложность и многообразие, задач автоматизации процесса производства бумаги. Состав и конфигурация систем автоматизации в первую очередь зависят от особенностей технологии получения бумаги.

В связи с тем, что сушильная часть БДМ является наиболее металлоемкой и энергоемкой ее частью, большое значение имеет рационализация процессов сушки, повышение эффективности работы сушильной части. Это достигается усовершенствованием конструкции элементов сушильной части и паро-конденсатной системы, применение новых видов одежды, утилизацией тепла в системе вентиляции сушильной части, нахождением и выбором оптимального технологического режима сушки, поддерживаемого затем с помощью систем автоматизации.

Цель работы: построить математическую модель на основании существующей системы автоматизации сушки бумажного полотна в сушильной части БДМ за счет улучшения временных и переходных характеристик регулирующих элементов для получения бумаги равномерной влажности.

Актуальность работы заключается в том, что контактная сушка является наиболее распространенным методом, но менее изученным. Работа систем управления контактной сушкой должна обеспечивать наиболее низкое соотношение расхода пара и количества удаленной воды из бумаги, вследствие предоставления возможности более гибкого снижения погрешности регулирования, и улучшения временных и частотных характеристик регулирующих элементов.

## **1 Описание технологии бумажного производства**

### **1.1 Исследование технологического процесса изготовления бумаги**

В настоящее время целлюлозно-бумажная промышленность является одной из ведущих в России. Она характеризуется достаточной конкурентоспособностью на внутреннем рынке и средней на мировом. Эта отрасль отличается от других большой материалоемкостью, энергоемкостью и водоемкостью. Одним из крупных комбинатов по производству различных видов бумаги является Полотняно-Заводская бумажная фабрика, основанная в 1728 году. Несмотря на обилие и разнообразие свойств технологическая схема изготовления бумаги может быть представлена в упрощенном виде.

Согласно общей технологической схеме [1], приведенной на рисунке 1, исходные волокнистые материалы в водной среде подвергаются размолу и, если их несколько, смешению в необходимом соотношении. На размолотую бумажную массу в зависимости от назначения бумаги вводят минеральные наполнители, проклеивающие и окрашивающие вещества. Бумажная масса с отрегулированной концентрацией аккумулируется в мешальном бассейне. Далее осуществляют дозированное разбавление бумажной массы оборотной водой, т.е. водой, возвращаемой в технологический процесс и взятой из-под сетки, на которой осуществлялось обезвоживание и формирование бумажного полотна. Такое использование оборотной воды позволяет снизить расход свежей воды, а также уменьшить потери в сток волокон и наполнителей, так как оборотная вода содержит некоторое количество мелких волокон и частиц наполнителя, прошедших с водой через сетку.

Разбавленную бумажную массу подвергают очистке от посторонних включений на очистной аппаратуре, после чего она поступает на бумагоделательную машину. Здесь происходит формирование бумажного

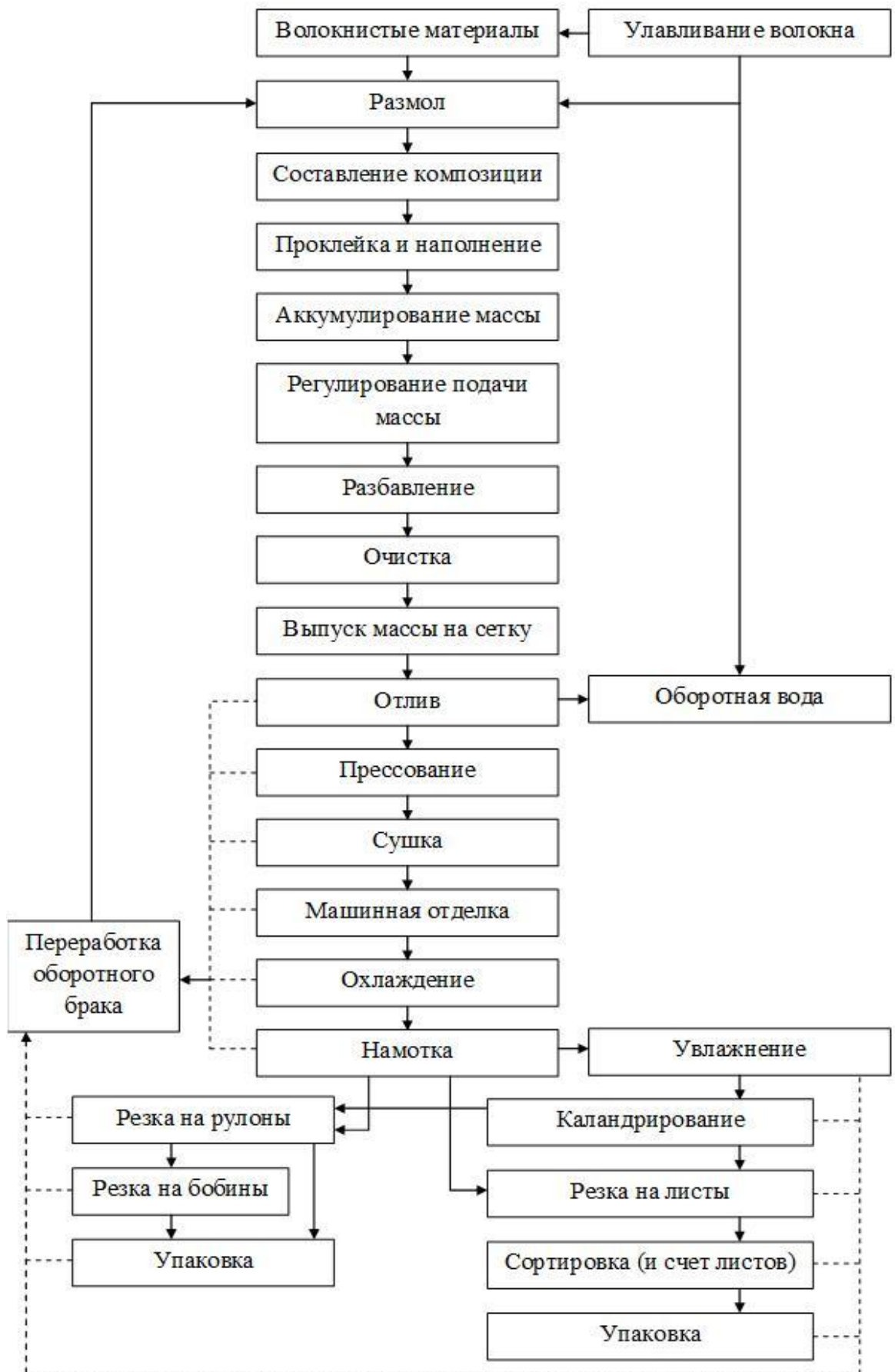


Рисунок 1 – Структурная схема производства бумаги

полотна, сопровождаемое его обезвоживанием на сетке, прессование, сушка, охлаждение полотна, увлажнение перед машинным каландрированием и намотка в рулон на накате. Если нужно повышенное уплотнение бумаги, увеличение ее прозрачности, повышение гладкости или лоска поверхности, то бумагу после дополнительного увлажнения пропускают через суперкаландр.

Готовую продукцию разрезают на рулоны или листы. Последние считают и упаковывают. Рулоны также упаковывают и отправляют на склад. Некоторые виды бумаги (конденсаторная, мундштучная, для телеграфной и кассовой лент и др.) разрезают на узкие ленты и наматывают в бобины.

Избыток оборотной воды направляют в улавливающую аппаратуру, откуда уловленные волокна используются в производстве, а осветленная вода идет в сток. Бумажный брак с бумагоделательной машины, суперкаландра, станков, разрезающих бумагу, ее перематывающих и упаковывающих, идет на переработку и в виде волокнистой массы используется для изготовления бумаги [6].

На рисунке 2 представлена схема бумагоделательной машины.

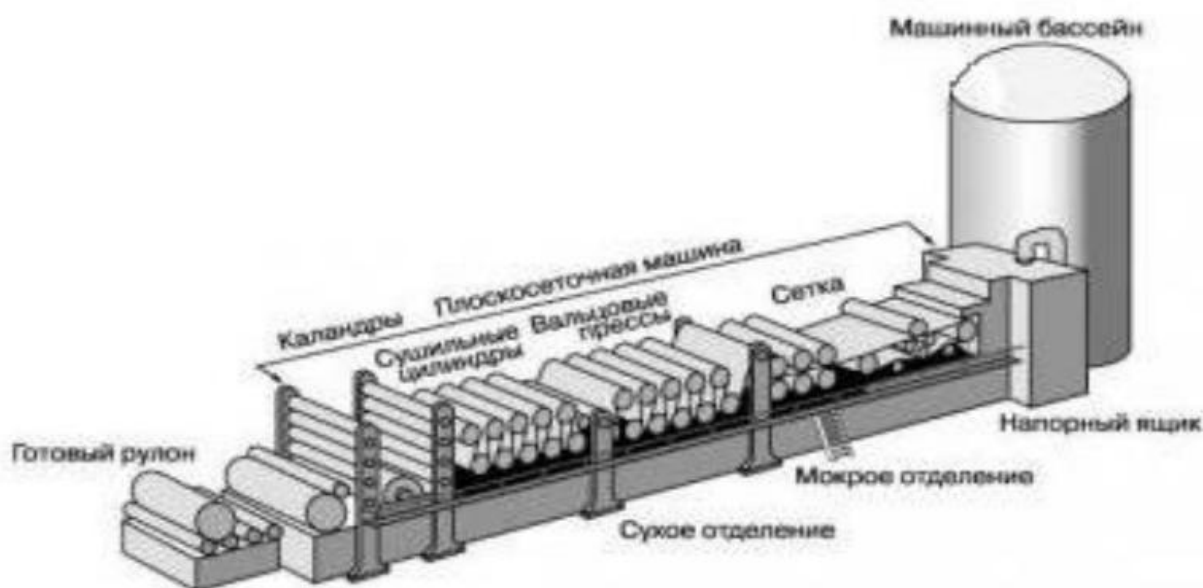


Рисунок 2 – Схема БДМ



## 1.2 Техническая характеристика сушильной части БДМ

Сушильная часть БДМ предназначена для достижения бумажного полотна конечной сухости, которая составляет 92-95%, влажности 6-9%.

Основными факторами процесса сушки бумаги являются:

- давление поступающего пара;
- температура поверхности сушильных цилиндров;
- скорость бумажной машины;
- свойства окружающего воздуха и система вентиляции;
- чистота внутренних и наружных стенок сушильного цилиндра;
- наличие воздуха и конденсата в цилиндрах;
- начальная влажность бумаги;
- натяжение сушильных сеток и их состояние;
- композиция бумаги и степень помола бумажной массы;

После выхода бумажного полотна из сушильной части и обработке на продольно резательном станке бумага должна отвечать следующим свойствам:

Бумага для гофрирования по ТУ 5441-019-00278965-2010, извещение об изменении №56, №60, №61а, №071.

Бумага должна изготавливаться в рулонах [2] по размерам в таблице 1. По согласованию с потребителем допускается изменять ширину и диаметр рулона.

Таблица 1 – Размеры рулонов

Наименование размера	Размер, мм	Допустимое отклонение, мм
Ширина рулона	550 - 2450	±5
Наружный диаметр рулона	1150	±50
Внутренний диаметр гильзы	100	+3

В зависимости от показателей качества бумага должна изготавливаться следующих марок: Б-0, Б-1, Б-2, Б-3. Физико-механические показатели качества бумаги должны соответствовать нормам [2], указанным в таблице 2 и таблице 3.

Таблица 2 – Физико-механические показатели Б-0., Б-1

Наименование показателей	Марка Б – 0					Марка Б – 1					Методы испытаний
Масса 1 м <sup>2</sup> , г	100±5	112±6	125±6	140±8	175±10	100±5	112±6	125±6	140±8	175±10	ГОСТ 13199
Абсолютное сопротивление продавливанию, кПа, не менее	300	340	380	420	450	270	320	350	380	410	ГОСТ 13525.8
Прочность при растяжении в машинном направлении, кН/м, не менее	6,5	7,5	8,5	9,5	11,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	ГОСТ ИСО 1924-1
Сопротивление торцевому сжатию гофрированного образца бумаги, (ССТ) кН/м, не менее	1,30	1,50	1,60	1,75	1,90	1,20	1,30	1,35	1,45	1,55	ГОСТ 28686
Сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца бумаги, (СМТ 0)Н, не менее: при ширине полоски 15 мм	215	260	310	350	400	210	240	280	330	340	ISO 9895
Сопротивление торцевому сжатию короткого образца SCTCD, кН/м	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	ISO 9895
Поверхностная впитываемость воды, г/м <sup>2</sup> , Кобб-30 в среднем по двум сторонам: клеёной не клеёной.	30 – 70					70					ГОСТ 12605
Влажность, %	6,0 – 9,0					6,0 – 9,0					ГОСТ 13525.19

Таблица 3 – Физико-механические показатели Б-2., Б-3

Наименование показателей	Марка Б – 2							Марка Б - 3					Методы испытаний
Масса 1 м 2, г	90±5	100±5	112±6	125±6	140±8	150±9	90+4	100±5	112±6	125±6	140±8	175±10	ГОСТ 13199
Абсолютное сопротивление продавливанию, кПа, не менее	210	250	280	310	310	330	200	220	250	260	270	300	ГОСТ 13525.8
Прочность при растяжении в машинном направлении, кН/м, не менее	5,0	5,5	6,0	7,0	7,5	8,0	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	ГОСТ ИСО 1924-1
Сопротивление торцевому сжатию гофрированного образца бумаги, (ССТ) кН/м, не менее	0,90	1,10	1,15	1,20	1,30	1,35	0,8	0,90	0,95	1,10	1,15	1,20	ГОСТ 28686
Сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца бумаги, (СМТ 0)Н, не менее: при ширине полоски 15 мм	140	180	190	230	250	225	110	140	150	170	190	210	ГОСТ 20682
Сопротивление торцевому сжатию короткого образца SCTCD, кН/м	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,1	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	ISO 9895
Поверхностная впитываемость воды, г/м2, Кобб-30 в среднем по двум сторонам: клеёной не клеёной.	30 – 70							70					ГОСТ 12605
Влажность, %	6,0 – 9,0							6,0 – 9,0					ГОСТ 13525.19

В бумаге допускается [14] изменение физико-механических показателей:

- снижение нормы показателя абсолютного сопротивления продавливанию для всех марок на 10%;
- снижение нормы показателя сопротивление плоскостному сжатию гофрированного образца для всех марок на 10%;
- снижение нормы показателя прочности при растяжении для всех марок на 10%;
- снижение нормы показателя сопротивление торцевому сжатию короткого образца для всех марок на 10%;
- снижение нормы показателя сопротивления торцевому сжатию гофрированного образца на 5%;
- изменение массы  $M_2$  до 6%
- снижение влажности до 5%

Бумага не должна иметь складок, морщин, задиров, разрывов и посторонних включений, видимых невооруженным глазом [2]. Допускаются малозаметные перечисленные внутри рулонные дефекты, которые не могут быть обнаружены в процессе изготовления бумаги, если показатель этих дефектов, определенный по ГОСТ 13525.5, не превышает 5%. Бумага для гофрирования на основе макулатуры должны иметь цвет естественного волокна. Количество обрывов в рулоне бумаги не должно превышать двух. Места обрывов должны быть склеены двухсторонней липкой лентой. Места склейки должны быть отмечены с торцов рулона цветными сигналами и не должны вызывать склеивания соседних слоев. Ширина склейки должна быть не менее 50 мм. Рулоны бумаги должны иметь плотную и равномерную по всей ширине рулона намотку. Торцы рулонов должны быть ровными.

### **1.3 Технологический процесс сушки бумаги и основное оборудование**

Для сушки тонкого листового материала бумаги применяется контактный метод, при котором тепло, необходимое для нагрева материала и испарения из него влаги, непосредственно передается от горячей поверхности сушильных цилиндров, обогреваемых паром. Движущееся бумажное полотно прижимается к нагретой поверхности цилиндров при помощи сушильных сукон, улучшающих теплопередачу и предотвращающих коробление и сморщивание поверхности бумаги при сушке.

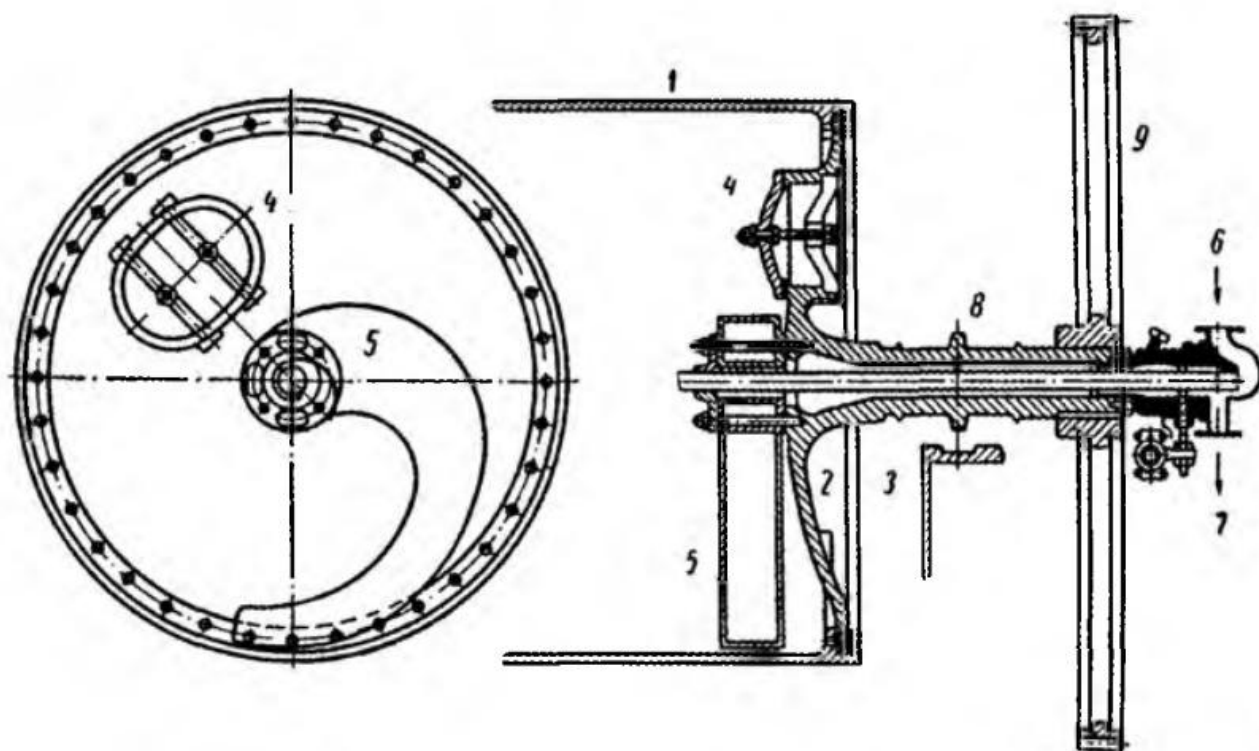
Размеры сушильной поверхности, число цилиндров и скорость движения бумажной ленты выбирают с таким расчетом, чтобы бумага, пройдя сушильную часть машины, успела высохнуть до содержания остаточной влаги в размере 6 - 9 % . Продолжительность сушки бумаги в сушильной части машины незначительна и обычно находится в пределах 20-40 секунд [1].

Такая контактная сушка является наиболее распространенным методом сушки после конвективной. Она применяется не только целлюлозно-бумажной промышленности, но также в текстильной, химической, пищевой и др. Однако этот способ сушки менее изучен, нежели конвективный, при котором тепло от воздуха или газов передается материалу путем соприкосновения, что объясняется сложностью, кратковременностью процесса, малой толщиной материала, изучить масса- и теплообмен которого очень трудно. Главный недостаток конвективного метода сушки в том, что влажность внутри материала больше, чем на его поверхности, а температура, наоборот, больше на поверхности.

Исследованию процесса сушки бумаги на нагретой поверхности было посвящено большое число работ: Д. М. Фляте [3], П. П. Бычкова, В. В. Красникова [4], А. В. Лыкова [5] и др. В этих работах исследовались переменные факторы, влияющие на процесс сушки, а также изучалось

испарение влаги на отдельных участках машины и влияние режимных параметров сушки на свойства бумаги.

Обычные сушильные цилиндры – литые из высококачественного мелкозернистого чугуна (рисунок 3). Они должны иметь равномерную по толщине стенку без раковин и других дефектов. Цилиндры протачивают снаружи и изнутри. Наружную поверхность сушильных цилиндров шлифуют и полируют. Торцовые крышки цилиндров обычно имеют сферическую, выпуклую форму и прикрепляются к фланцам цилиндра болтами.



1-боковая стенка цилиндра; 2-торцовая крышка; 3-кожух; 4 - лаз; 5 - черпак; 6 - ввод пара; 7- выход конденсата; 8 - полая цапфа цилиндра; 9-приводная шестерня

Рисунок 3 – Сушильный цилиндр

Контактная сушка характеризуется тремя периодами. В первом периоде осуществляется постепенное повышение температуры цилиндров, влажность полотна падает незначительно. Основная масса влаги удаляется во втором периоде, характеризуемом постоянной скоростью сушки. В третьем периоде температура цилиндров снижается.

Для каждого вида бумаги задаётся определенный вид графика сушки. Необходимость соблюдения температурного графика привела к разделению сушильных цилиндров на группы. Схемы пароснабжения и удаления конденсата чрезвычайно разнообразны. В настоящее время чаще всего используются комбинированные схемы поступления пара в группы, сочетающие подачу свежего пара из главного паропровода и последовательный перепуск вторичного пара из предыдущих групп.

Паро-конденсатная система, подразделяется на следующие позиции, по подаче пара представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Позиции цилиндров

Группы цилиндров	Количество цилиндров в группе
1 - 10 сушильные цилиндры	10 цилиндров Ø 1500 на остром паре
11-18 сушильные цилиндры	8 цилиндров Ø 1500 на остром паре
19 - 24 сушильные цилиндры (досушивающая группа)	6 цилиндров Ø 1500 на вторичном паре

Пар по главному трубопроводу, диаметр которого равен 150 мм, подается из котельной с давлением 13 кгс/см<sup>2</sup> и температурой 194 °С.

На главном паропроводе перед БДМ установлены регулирующие клапана для подачи пара на БДМ давлением до 5,0 кгс/ см<sup>2</sup>. На регулирующих клапанах установлены запасные линии с ручными клапанами для подачи пара на БДМ при поломке регулирующих клапанов [14].

После регулирующих клапанов по трубопроводу пар поступает в коллектор сушильных цилиндров группы 1 и в коллектор сушильных цилиндров группы 2; Затем паро-конденсатная смесь из указанных выше цилиндров поступает в водоотделитель 1 (ВО-1). В водоотделителе 1 (ВО-1) происходит процесс снижения давления паро-конденсатной смеси за счет резкого увеличения объема, в результате чего происходит вскипание смеси и образуется вторичный пар.

Вторичный пар из водоотделителя ВО-1 поступает в сушильные цилиндры третьей группы, а оставшийся конденсат за счет разницы давлений из водоотделителя ВО-1 поступает в водоотделитель ВО-2. Уровень конденсата в водоотделителе ВО-1 поддерживается автоматически регулирующим клапаном.

Образовавшийся вторичный пар во ВО-2 по трубопроводу поступает через теплообменник в бак сбора конденсата. На теплообменнике запорная арматура на входе и выходе должна быть открыта. Из второго водоотделителя конденсат насосами для перекачки конденсата типа м-1 или м-2 подается в бак сбора конденсата, а уровень в нем поддерживается в автоматическом режиме регулирующим клапаном.

Конденсат из бака сбора конденсата насосами подается в деаэратор котельной. Уровень конденсата в баке сбора конденсата поддерживается путем пуска/останова насосов. Обслуживание и контроль за работой паро-конденсатной системы осуществляется сушильщиком.

#### **1.4 Выводы по 1 главе**

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

- 1) проанализировать существующую АСУ сушильной части бумагоделательной машины и описать средства автоматизации в соответствии с функциональной схемой;
- 2) построить модель системы сушильной части БДМ в виде «черного ящика» и выполнить ее декомпозицию;
- 3) создать модель САУ влажностью бумажного полотна в модуле Simulink пакета MatLab и исследовать ее временных и переходных характеристик.



## **2 Автоматизация процесса сушки**

### **2.1 Анализ САУ основного оборудования сушильной части БДМ**

Сушильная часть состоит из 24 сушильных цилиндров, разделенных на 3 приводные группы, включающие в себя цилиндры в обоих рядах в следующем количестве:

1 группа – с 1 по 10 с. ц. (1, 3, 5, 7, 9 нижние сушильные цилиндры, 2, 4, 6, 8, 10 верхние сушильные цилиндры).

2 группа – с 11 по 18 с. ц. (11, 13, 15, 17 нижние сушильные цилиндры, 12, 14, 16, 18 верхние сушильные цилиндры).

3 группа - с 19 по 24 с. ц. (19, 21, 23 нижние сушильные цилиндры, 20, 22, 24 верхние сушильные цилиндры).

На каждую группу цилиндров приходится две сушильные сетки, одна из которых охватывает все цилиндры верхнего ряда, вторая - все цилиндры нижнего ряда, длина сушильного цилиндра 2400 мм, а диаметр 1500 мм.

На каждой сушильной группе сверху и снизу установлены сеткоправки, управление которыми может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме. Всего имеется 6 сеткоправок. Количество сетководущих валиков (с учетом сеткоправок, сетконатяжек) 67 шт. Диаметр сетководущих валиков 167 мм, длина 2500 мм. Бумажное полотно при прохождении по нагретым бумагосушильным цилиндрам плотно прижимается к ним сушильными сетками, в процессе чего улучшаются следующие свойства: механическая прочность, объемный вес, гладкость, влагопрочность, впитывающая способность и степень проклейки.

Сушильные сетки изготавливаются с использованием 100 % гидролиза стойких полиэфирных мононитей.

К сеткам должны обладать такими качествами как: прочность, гибкость, стабильность размеров, воздухопроницаемость и пористость. Сушильная сетка

облегчает заправку и транспортировку полотна по сушильной части, а также предотвращает коробления и образование морщин.

Система управления сушильной части на БДМ имеет локальный характер.

Существующая система автоматизации включает следующие системы автоматизации;

- САУ подачи пара на сушильную часть;
- САУ подачей пара на основные сушильные группы;
- САУ подачей пара на досушивающую группу;
- САУ уровнем в водоотделителях;
- САУ сбора и откачки конденсата в деаэрактор.

Параметры процесса сушки и способы их регулирования представлены в таблице 5.

## **2.2 Описание функциональной схемы автоматизации**

Основная цель автоматизации сушки бумажного полотна в сушильной части БДМ состоит в регулировании давления и получения бумаги оптимальной и равномерной влажности, рисунок 4 [19].

Работа систем управления контактной сушкой должна быть согласована с решением основной задачи, которая заключается в обеспечении наиболее низкого соотношения расхода пара и количества удаленной воды из бумаги.

Все сушильные цилиндры разбиваются на несколько групп, чтобы между паровыми коллекторами, а также между паровым коллектором и коллектором конденсата был перепад давления. Основными регулируемыми параметрами являются: давление пара, перепад давления, уровни в водоотделителях, влажность и масса 1 м<sup>2</sup> бумаги.

Давление пара в главном паровом коллекторе и в коллекторе каждой сушильной группы регулируется с помощью АСР (поз.1) и (поз. 4,5,6).

Перепад давления между паровым коллектором и коллектором конденсата регулируется изменением расхода пара, перепускаемого из водоотделителя

Таблица 5 – Параметры процесса сушки

№	Позиция	Контролируемый параметр	Средство (метод) и частота контроля	Контр. Лицо
1	Давление пара перед регулирующими клапанами (поз.1-2)	до (13 кгс/ см <sup>2</sup> ) 1,3 МПа	Манометр 0 – 1,6 МПа	Сушильщик 4 разряда
2	Давление пара после регулирующих клапанов	не более 8,0 кгс/см <sup>2</sup>	Регулятор давления пара. АРМ оператора	Сушильщик 4 разряда
3	Давление пара: - сушильные цилиндры - в водоотделителях ВО-1 - в водоотделителях ВО-2	не более 5,0 кгс/ см <sup>2</sup> не более 4,0 кгс/ см <sup>2</sup> не более 1,5 кгс/ см <sup>2</sup>	Манометр 0 – 16 кгс/ см <sup>2</sup> и пульт управления Манометр 0 – 6 кгс/ см <sup>2</sup> Манометр 0 – 6 кгс/ см <sup>2</sup>	Сушильщик 4 разряда
4	Температура пара, °С: - после регулирующего клапана	180 – 184	На панели оператора (микровычислительное устройство МЕТРАН 334)	Сушильщик 4 разряда
	- 1 – 10 суш. Цилиндры - 11 – 18 суш. цилиндры - 19 – 24 суш. Цилиндры	130 – 145 150 – 158 150 – 158	На панели оператора	
5	Давление в баке сбора конденсата	не более 0,5 кгс/ см <sup>2</sup>	Манометр 0 – 6 кгс/ см <sup>2</sup>	Сушильщик 4 разряда
6	Уровень конденсата во ВО-1, ВО-2	до ~ 300 мм	Визуально на панели оператора (программный регулятор ВО-1, ВО-2)	Сушильщик 4 разряда
7	Уровень в конденсатном баке	300 – 1000 мм водоизмерительного стекла	Визуально Через каждые 30 минут в течение всей смены	Сушильщик 4 разряда
8	Работа насосов конденсата		Визуально Через каждый час в течение всей смены	Сушильщик 4 разряда
9	Влажность бумаги (картона)	6,0 – 9,0 %	Постоянно в течение всей смены АРМ оператора	Сушильщик 4 разряда
10	Температурный график сушильных цилиндров.	Таблицы	По данным лаборатории (ОТК) и самостоятельно контактным термометром цифровым ТК-5-01-20-+200 Ос	Сушильщик 4 разряда
			1 раз в смену и по необходимости Пирометром оптическим цифровым С-7-10-+200А	Контролер ЦБП 3 разр.

(поз.3). В водоотделителях регулируются уровни конденсата (поз.7, 8), а также уровень в баке сбор конденсата (поз. 9).

Регулирование влажности бумаги производится по каскадной схеме: выход с регулятора влажности (поз.10) используется в качестве задания регулятору давления пара в основной сушильной группе.

Масса  $1 \text{ м}^2$  бумаги регулируется (поз.11) путем изменения расхода бумажной массы перед смесительным насосом.

Общий расход пара на сушку контролируется АСК расхода (поз.2).

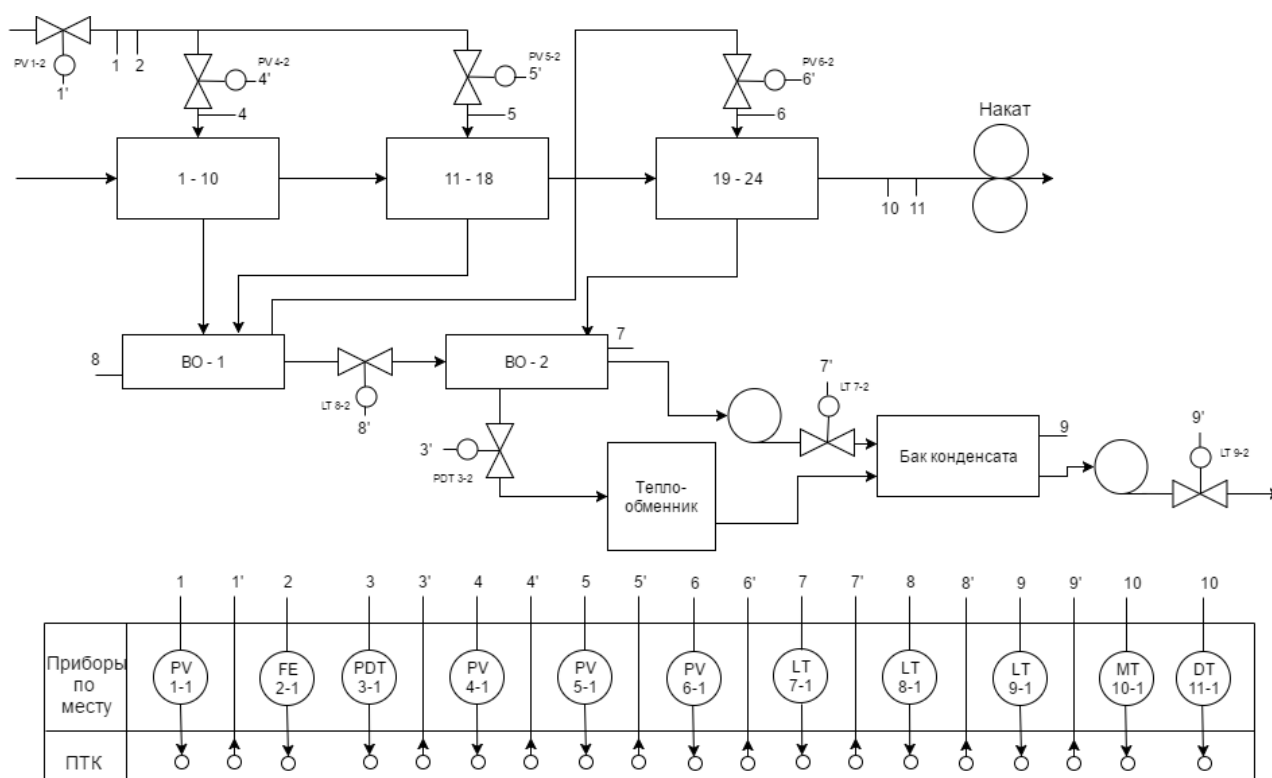


Рисунок 4 – Функциональная схема системы автоматизации

### 2.3 Технические средства автоматизации

При выборе средств автоматизации необходимо учитывать такие факторы как вид используемой энергии наличие унифицированных сигналов, после подсчета сигналов, необходимо дополнительно выделить еще 15% от общего

числа под резерв, область применения, климатическое исполнение, доступность, цена и др.

Модульное построение АСУ ТП позволяет наращивать количество локальных комплексов управления технологического уровня при реконструкции существующей автоматики или при вводе в эксплуатацию новых единиц основного технологического оборудования.

В данном случае предпочтительным является использование техники фирмы MITSUBISHI. Первой причиной является то, что продукция этой компании не уступает по своим техническим показателям аналогии других фирм. Второй причиной является то, что программно-технический комплекс (ПТК) этой фирмы имеет меньшую стоимость, чем ПТК других фирм. Так же немало важной причиной является то, что работа КТС возможна и в тяжелых условиях. Предлагаемый контроллер выполняет все функции релейной автоматики, позволяет принимать унифицированные сигналы, сигналы с термопар и термо-сопротивлений, осуществлять ручное управление технологическим процессом, отказаться от большого количества сигнальных ламп и кнопок управления. Так как весь технологический процесс отображается на панели управления.

Контроллер фирмы MITSUBISHI серии FX, представленный на рисунке 5, выполняет следующие функции:

- Собирает и обрабатывает данные о состоянии исполнительных механизмов;
- Собирает и обрабатывает измерительную информацию, получаемую от контролируемого процесса;
- Выполняет логические операции;
- Аварийная обработка данных;
- Отображение и распечатка текущих и аварийных трендов;
- Повышение надежности и безопасности оборудования;
- Автоматический пуск и останов оборудования;
- Защиты и блокировки;

- Комплексная диагностика технологического оборудования и системы управления;
- Оперативный контроль и отображение технологического процесса.

Программируемый логический контроллер (ПЛК) семейства FX – это программируемые контроллеры универсального назначения. Компактные контроллеры объединяют в одном корпусе дискретный ввод/вывод, центральный процессор, память и электропитание. Возможности их применения можно расширить, благодаря различным опциям, например дополнительным входам и выходам, аналоговому вводу/выводу. Контроллеры семейства FX можно подключить ко всем наиболее распространенным сетям, например, Ethernet.CC-Link, Profibus и т.д.

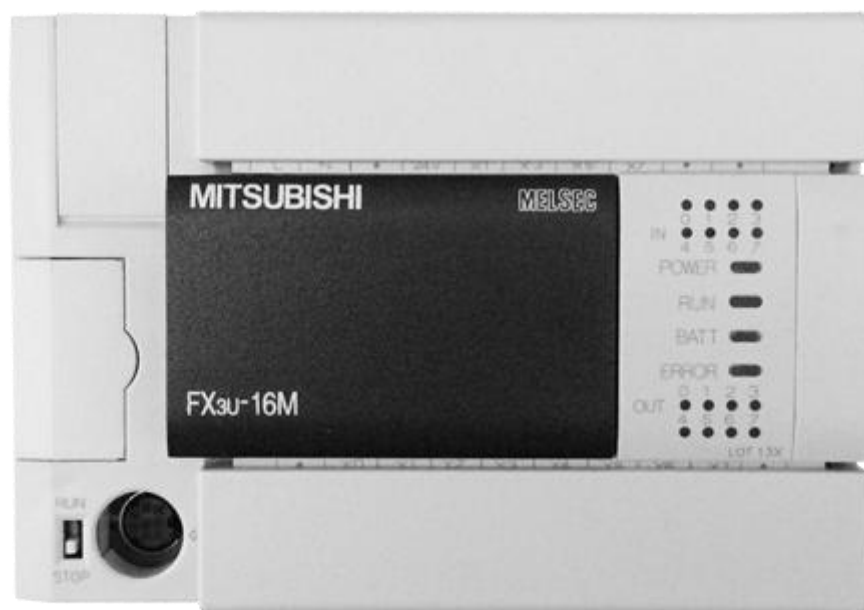


Рисунок 5 –ПЛК Mitsubishi FX3U-16M

Модуль центрального процессора (CPU): предназначен для решения задач различного уровня сложности, и может использоваться разных типов производительности. Используя дополнительные опции аналоговых или дискретных входов/выходов, модули позиционирования, модули интерфейсов можно создать гибкую систему управления для любой задачи автоматизации.

Центральный процессор CPU FX3U предназначен для построения относительно простых систем так и сложных процессов с высоким требованием к скорости обработки информации и малым временем реакции.

На данный момент FX3U с его временем цикла 0,065 мкс на каждую логическую операцию является самым быстрым контроллером семейства FX. Входы и выходы обрабатываются с более высокой частотой, программа реагирует быстрее и пользователь выигрывает благодаря более высокой точности процесса. Память может вмещать до 64000 шагов программы [6].

Модуль ввода аналоговых сигналов FX2N-8AD выполняет аналого-цифровое преобразование входного аналогового сигнала и формирует цифровые значения мгновенных значений аналоговых величин. Эти значения используются центральным процессором в ходе выполнения программы.

Аналоговый модуль FX2N-8AD (рисунок 6) с 8 каналами способны определять напряжение, токи, температуру (в том числе одновременно). Разрешающая способность аналогового модуля семейства FX составляет от до 16 бит [7].



Рисунок 6 – Модуль аналогового ввода FX2N-8AD

Модуль вывода аналогового сигнала FX2N-4DA (рисунок 7) предназначен для цифро-аналогового преобразования внутренних цифровых величин контроллера в выходные аналоговые сигналы [7].



Рисунок 7 – Модуль аналогового вывода FX2N-4DA

Модуль дискретного ввода FX2N-8EX-ES/UL (рисунок 8) позволяет принимать и обрабатывать сигналы с концевых выключателей и аварийных кнопок [7].



Рисунок 8 – Модуль дискретного ввода FX2N-8EX

Модуль дискретного вывода FX2N-8EYR-ES/UL предназначен для управления магнитными пускателями, релейной автоматикой и сигнальными лампами [7].





Рисунок 9 – Модуль дискретного вывода FX2N-8EYR

Имея встроенный интерфейс для программирования и связи между контроллером и панелью оператора [6], дает возможность создать небольшую автоматизированную систему, а встроив дополнительный интерфейсный адаптер можно использовать его в качестве второго коммуникационного интерфейса RS485/RS422/RS232/USB для программирования или для построения коммуникационной сети.



Рисунок 10 - Коммуникационный модуль

Применение модуля интерфейса FX3U-ENET позволяет расширить функции связи ПЛК с другими ПЛК и построить систему АСУТП верхнего уровня для решения более глобальных задач автоматизации производства. Панель оператора, обеспечивающая человеко-машинный интерфейс, облегчает диалог между оператором и машиной.

Панель серии G1000 –это сенсорный экран, с высоким разрешением от 256 до 65536 цветов с возможностью отображать сложные графические элементы. Мультимедийные возможности позволяют использовать видеоролики в качестве подсказок для оператора (например, при неполадках). Для программирования семейства GOT имеется среда программирования GT Designer2, которую можно установить на любом компьютере с операционной системой Windows.

Основные функции и решаемые задачи ПТК на базе контроллера серии FX3U.

- 1) Реализация всех систем автоматического контроля и управления, указанных в схеме автоматизации.
- 2) Адаптивная настройка САУ без вмешательства оператора.
- 3) Управление с пульта исполнительными механизмами.
- 4) Плавный переход системы из автоматического режима работы в ручной.

Для определения количества аналоговых и дискретных модулей необходимо посчитать количество и виды входных и выходных сигналов. Результаты подсчета аналоговых входных и выходных сигналов сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Входные аналоговые сигналы

№	Наименование технологического параметра	Вид сигнала	Количество
1	Давление пара в главном коллекторе	4-20 мА	1
2	Положение позиционера №1	4-20 мА	1
3	Расход пара	4-20 мА	1

Продолжение таблицы 6.

4	Давление пара 1 сушильной группы	4-20 мА	1
5	Положение позиционера №2	4-20 мА	1
6	Давление пара 2 сушильной группы	4-20 мА	1
7	Положение позиционера №3	4-20 мА	1
8	Давление пара 3 досушивающей группы	4-20 мА	1
9	Положение позиционера №4	4-20 мА	1
10	Уровень в емкости конденсата	4-20 мА	1
11	Ток двигателя насоса конденсата	0-5 мА	1
12	Уровень водоотделителя №1	4-20 мА	1
13	Уровень водоотделителя №2	4-20 мА	1
14	Плотность бумажного полотна	4-20 мА	1
15	Влажность полотна	4-20 мА	1

Унифицированных сигналов – 15

Таблица 7 - Выходные аналоговые сигналы

№	Наименование технологического параметра	Вид сигнала	Количество
1	Задание давления главного коллектора	4-20 мА	1
2	Задание давления 1 группы	4-20 мА	1
3	Задание давления 2 группы	4-20 мА	1
4	Задание давления досушивающей 3 группы	4-20 мА	1
5	Задание уровня водоотделителя №1	4-20 мА	1
6	Задание уровня водоотделителя №2	4-20 мА	1
7	Задание уровня в емкости конденсата	4-20 мА	1
8	Задание влажности бумажного полотна	4-20 мА	1

Унифицированных сигналов – 8

Итого: Унифицированных сигналов – 23

При подсчете сигналов также необходимо учесть дискретные сигналы для следующих параметров, результаты которых представлены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Выходные дискретные сигналы

№	Наименование технологического параметра	Вид сигнала	Количество
1	Включение вытяжного вентилятора №1	0-24 В	1
2	Включение вытяжного вентилятора №2	0-24 В	1
3	Включение насоса конденсата	0-24 В	1
4	Световая сигнализация аварии	0-24 В	1

Сигналов – 4

Таблица 9 – Входные дискретные сигналы

№	Наименование технологического параметра	Вид сигнала	Количество
1	Подтверждение включения вентилятора №1	0-24 В	1
2	Подтверждение включения вентилятора №1	0-24 В	1
3	Подтверждение включения насоса конденсата	0-24 В	1
4	Кнопка аварийного останова №1	0-24 В	1
5	Кнопка аварийного останова №2	0-24 В	1

Сигналов – 5

Всего сигналов – 9

Входных – 5; Выходных – 4.

Спецификация программно-технического комплекса (ПТК) фирмы MITSUBISHI приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Спецификация ПТК

Наименование и техническая характеристика	Тип, марка обозначение.	Количество
Модуль центрального процессора	FX3U- 16 MT/ESS	1
Программное обеспечение	GX Developer	1
Модуль ввода аналоговых сигналов	FX2N-8AD	3
Модуль вывода аналогового сигнала	FX2N8DA	2
Модуль дискретного ввода	FX2N-8EX- ES/UL	1
Модуль дискретного вывода	FX2N-8EYR-ES/UL	1
Панель оператора	G1000	1
Коммутатор сети Ethernet	FX3U-ENET	1

При автоматизации тепловых процессов, процесса сушки бумажного полотна нужно использовать приборы, имеющие стандартные унифицированные сигналы. Система автоматизации должна строиться на однотипных приборах одной серии или фирмы.

Для измерения избыточного давления в главном коллекторе и сушильных группах БДМ используется измеритель преобразователь избыточного давления, Метран-150TG штуцерного исполнения (рисунок 11). Интеллектуальные преобразователи давления этой серии являются более совершенной модификацией преобразователей давления Метран-100. Технические характеристики Метран-150 TG представлены в таблице 11 [8].



Рисунок 11 – Датчик давления Метран 150 TG

Таблица 11 – Технические характеристики Метран 150 TG

Наименование параметра	Значение параметра
Измеряемые среды	пар, газ, газовые смеси, жидкости.
Диапазоны измеряемых давлений	минимальный 0-0,025 кПа максимальный 0-68 Мпа.
Выходные сигналы	4-20 мА с HART-протоколом; 0-5 мА.
Основная приведенная погрешность	до $\pm 0,075\%$ ;
температура окружающей среды	от -40 до 80°C
Гарантийный срок эксплуатации	3 года.
Межповерочный интервал	4 года

Для измерения перепада давления пара в водоотделителях, а также уровня конденсата в водоотделителях и в баке сбора конденсата используется датчик давления Метран 150 CD (рисунок 12) фланцевого исполнения. Технические характеристики данного датчика приведены в таблице 12.



Рисунок 12 – Датчик давления Метран 150CD

Таблица 12 – Технические характеристики Метран 150 TG

Наименование параметра	Значение параметра
Измеряемые среды	пар, газ, газовые смеси, жидкости.
Диапазоны измеряемых давлений	минимальный 0,25 кПа максимальный 6,3 кПа.
Выходные сигналы	4-20 мА с HART-протоколом; 0-5 мА.
Основная приведенная погрешность	до $\pm 0,075\%$ ;
температура окружающей среды	от -40 до 80°C
Гарантийный срок эксплуатации	3 года.
Межповерочный интервал	4 года

Счетчик пара Метран-332 (рисунок 13) предназначен для измерения объемного расхода, избыточного давления и температуры пара, вычисления массового расхода и массы пара, тепловой энергии и тепловой мощности [9],



Рисунок 13 – Счетчик пара вихревой Метран-332

Для определения уровня в водоотделителях №1 и №2, а также в баке сбора конденсата, используем измерительный преобразователь гидростатического давления (уровня) с диапазоном измерения 0-25 кПа. Избыточное давление 0,4 МПа. Выход 4-20 мА. Преобразователь Метран-150L имеет вид, представленный на рисунке 14.



Рисунок 14 – Датчик гидростатического давления (уровня) МЕТРАН 150L



Для регулирования уровня в водоотделителях 1 и 2, а также в баке сбора конденсата используется электропневматический позиционер фирмы SAMSON типа 3767 [10]. Позиционер дополнительно оснащен сигнализаторами положения. Состоит из электропневматического преобразовательного модуля (I./р-преобразователь) и пневматической части, оснащенной следящим рычагом перестановки, измерительной мембраной и пневматической системой управления, включающей сопло, отражательную заслонку и усилитель. Поступающий с регулирующего устройства сигнал постоянного тока в пределах 4-20мА подается на электропневматический преобразовательный модуль, где преобразуется в сигнал пропорционального управляющего давления Па. В таблице 13 представлены технические характеристики позиционера.

Таблица 13 – Техническая характеристика позиционера

Наименование параметра	Значение параметра
Входной аналоговый унифицированный сигнал	4 – 20 мА
	0 – 20 мА
Входное сопротивление 4-20мА	Макс 200ом Ом
Входное сопротивление 0-5 мА	Макс 880 Ом
Отношение угла поворота к входному сигналу	Линейное. Отклонение характеристики при установке в фиксированной точке $\leq 1\%$
Давление питания	140 к Па – 600 кПа
Направление действия	обратимое
Температура окружающей среды	-25...+850С

Регулирующий и быстрозакрывающийся клапан состоит из проходного клапана Тип -3241 и пневматического привода Тип-3277 для прямого монтажа позиционера [11], а также смонтированного управляющего соленоидного 3/2-

ходового магнитного клапана и грязеуловителя. Вид самого клапан представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Клапан с приводом типа 3241

Для измерения влажности и массы применяется измерительный преобразователь "Аквар 1207 "

Инфракрасный влагомассомер "Аквар 1207" предназначен для непрерывного и бесконтактного измерения влажности и массы бумажного полотна в технологическом процессе производства бумаги. Прибор может работать автономно или в качестве информационно-измерительной части АСУТП.



Рисунок 16 – Измерительный преобразователь влажности и массы "Аквар 1207"

Влагомассомер "Аквар 1207" состоит из микропроцессорного блока обработки сигналов, блока инфракрасного излучателя, блока приема и блока питания [13]. Излучатель и приемник устанавливаются на сканирующем устройстве любого типа с противоположных сторон бумажного полотна. При отсутствии воздушного охлаждения, влагомассомер работает при температуре окружающего воздуха от +5 до + 50. Контроль параметров бумажного полотна осуществляется путем измерения коэффициентов поглощения инфракрасного излучения на трех длинах волн. Микропроцессорный блок обеспечивает обработку цифровых сигналов от приемника, вывод полученных значений на индикацию, ввод поправок в показания датчика.

С целью интеграции с системами АСУ ТП данный влагомассомер оснащен цифровым интерфейсом RS-232 или RS-485 и аналоговым интерфейсом. Токовый выход равен 4-20 мА. Расчет и коррекция рабочих коэффициентов осуществляется в производственных условиях по результатам лабораторных измерений контролируемых параметров. Технические характеристики приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Техническая характеристика измерительного преобразователя "Аквар 1207"

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измерения влажности	1-15 %
Точность измерения влажности	±0.2 % (абс.)
Диапазон измерения массы	20-180,150-350 г/м <sup>2</sup>
Точность измерения массы	±1.0 % (отн.)
Масса	5.9 кг
Мощность	50 Вт

Структурная схема связи КТС с объектом представлена на рисунке 17.

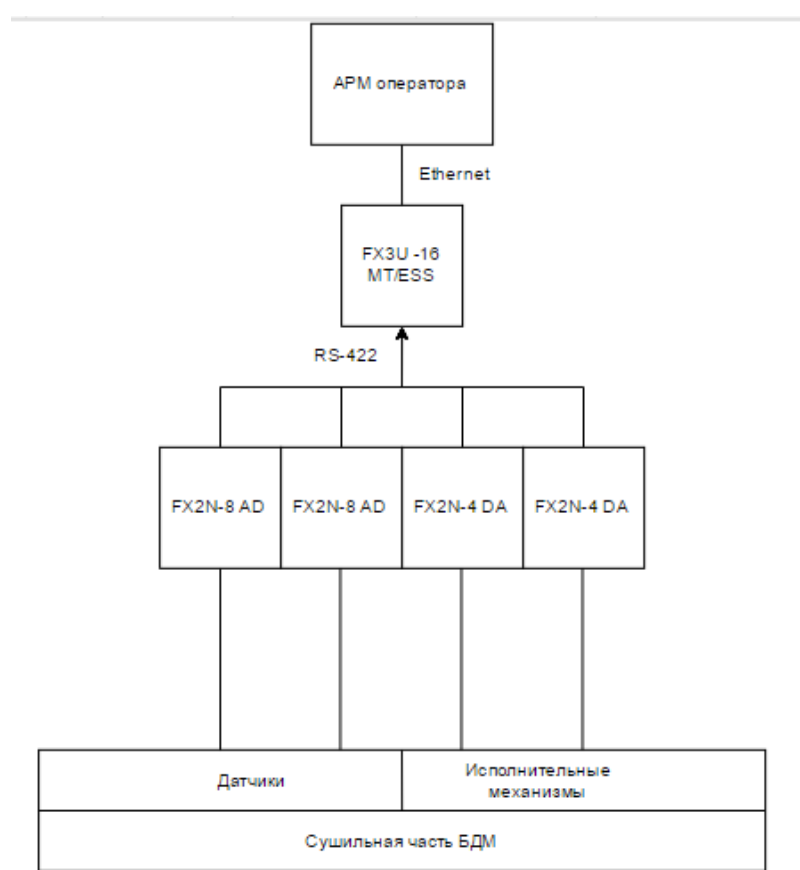


Рисунок 17 – Структурная схема связи КТС с сушильной частью

Выбранные технические средства позволяют контролировать необходимые основные входные параметры технологического процесса сушки, оказывающие влияние на выходной параметр влажность, который характеризует качество изготавливаемой бумаги.

## **2.4 Выводы по 2 главе**

На основании функциональной схемы были описаны технические средства автоматизации, наиболее применяемые в области бумажного производства. Построена структурная схема связи комплекса технических средств с сушильной частью бумагоделательной машины.

### 3 Моделирование автоматизации сушильной части

#### 3.1 Представление модели в виде черного ящика

Исследование с помощью метода «черного ящика» [18] заключается в том, что осуществляется предварительное наблюдение за взаимодействием системы с внешней средой и установление списка входных и выходных воздействий, среди которых выделяются существенные воздействия. Затем осуществляется выбор входов и выходов для исследования с учетом имеющихся средств воздействия на систему и средств наблюдения за ее поведением.

На следующем этапе производится воздействие на входы системы и регистрация ее выходов. В процессе изучения наблюдатель и «черный ящик» образуют системы с обратной связью, а первичные результаты исследования – множество пар состояний входа и выхода, анализ которых позволяет установить между ними причинно-следственную связь (рисунок 18).



Рисунок 18 – Модель «черного ящика»

Определив входы, выходы и возмущающие воздействия построим модель системы в виде «черного ящика». Для построения данной модели и ее декомпозиции воспользуемся методологией структурного анализа и проектирования (SADT) представленной функциональными диаграммами IDEF0.

Таблица 15 – Входы и выходы системы

<b>Входы</b>	<b>Выходы</b>	<b>Возмущающие воздействия</b>
Влажность бумаги на входе сушильной части БДМ	Влажность бумаги	Температура окружающей среды
Поверхностная плотность бумажного полотна		Давление окружающей среды
Скорость БДМ		
Натяжение сетки		
Давление пара		
Количество пара		
Температура пара		

Методология IDEF0 предписывает построение иерархической системы диаграмм - единичных описаний фрагментов системы. Сначала проводится описание системы в целом и ее взаимодействия с окружающим миром (контекстная диаграмма), после чего проводится функциональная декомпозиция - система разбивается на подсистемы и каждая подсистема описывается отдельно (диаграммы декомпозиции).

Каждая сторона блока в диаграмме имеет определенное назначение. Левая сторона блока предназначена для входов, верхняя – для управления, нижняя – для механизмов, правая – для выходов. Такое обозначение отображает определенные системные принципы: входы преобразуются в выходы, управление ограничивает или предписывает условия выполнения преобразований, механизмы показывают, что и как выполняет функция.

Построим контекстную диаграмму, которая имеет такой же смысл, что и модель «черного ящика» (рисунок 19).

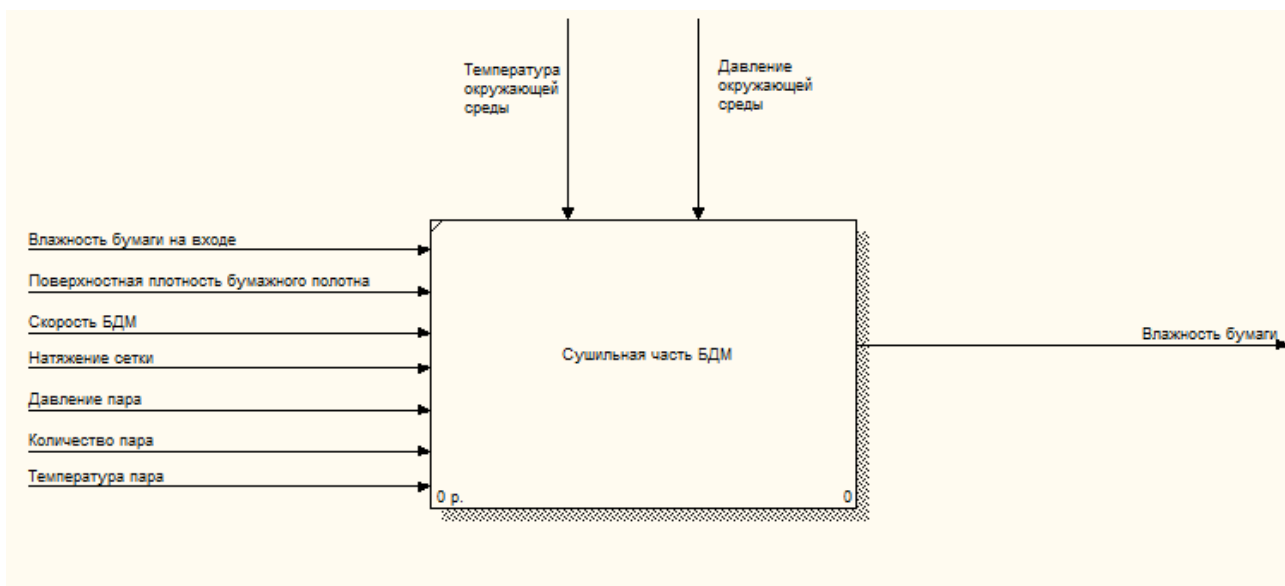


Рисунок 19 – Контекстная диаграмма системы

### 3.2 Модель состава системы

Очевидно, что вопросы, касающиеся внутреннего устройства системы, невозможно решить только с помощью модели черного ящика. Для этого необходимо более развитые, более детальные модели.

При рассмотрении любой системы, прежде всего, обнаруживается то, что ее целостность и обособленность, отображенные в модели черного ящика, выступают как внешние свойства. Внутренность же ящика оказывается неоднородной, что позволяет различать составные части самой системы. При более детальном рассмотрении некоторые части системы могут быть в свою очередь разбиты на составные части и т.д., результате чего получается модель состава системы [15].

Модель состава – перечень подсистем и элементов, из которых состоит система, с указанием отношения вложенности. Элементы – это те части, которые рассматриваются как неделимые. Система разделяется на элементы различными способами в зависимости от формулировки задачи, цели и конкретизации в процессе анализа. Иногда изменяют принцип разбиения, выделяя другие элементы.



Части системы, состоящие более чем из одного элемента, называются подсистемами. Деление на подсистемы выявляет взаимозависимые элементы с относительно обособленными функциями-подцелями, способствующими достижению общей цели системы [16].

Анализируя сушильную часть бумагоделательной машины, построили модель состава системы, представленная на рисунке 20.

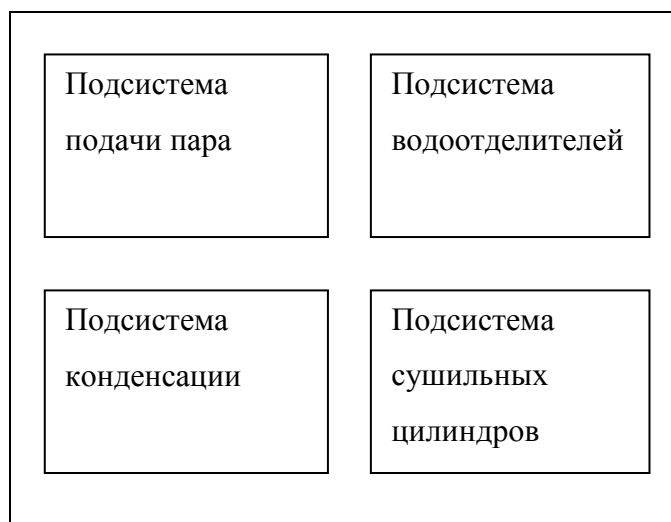


Рисунок 20 – Модель состава системы

### 3.3 Декомпозиция модели черного ящика

После разработки контекстной диаграммы и модели состава системы выполняется процесс декомпозиции модели. Результаты декомпозиции представлены на рисунках 21 и 22.

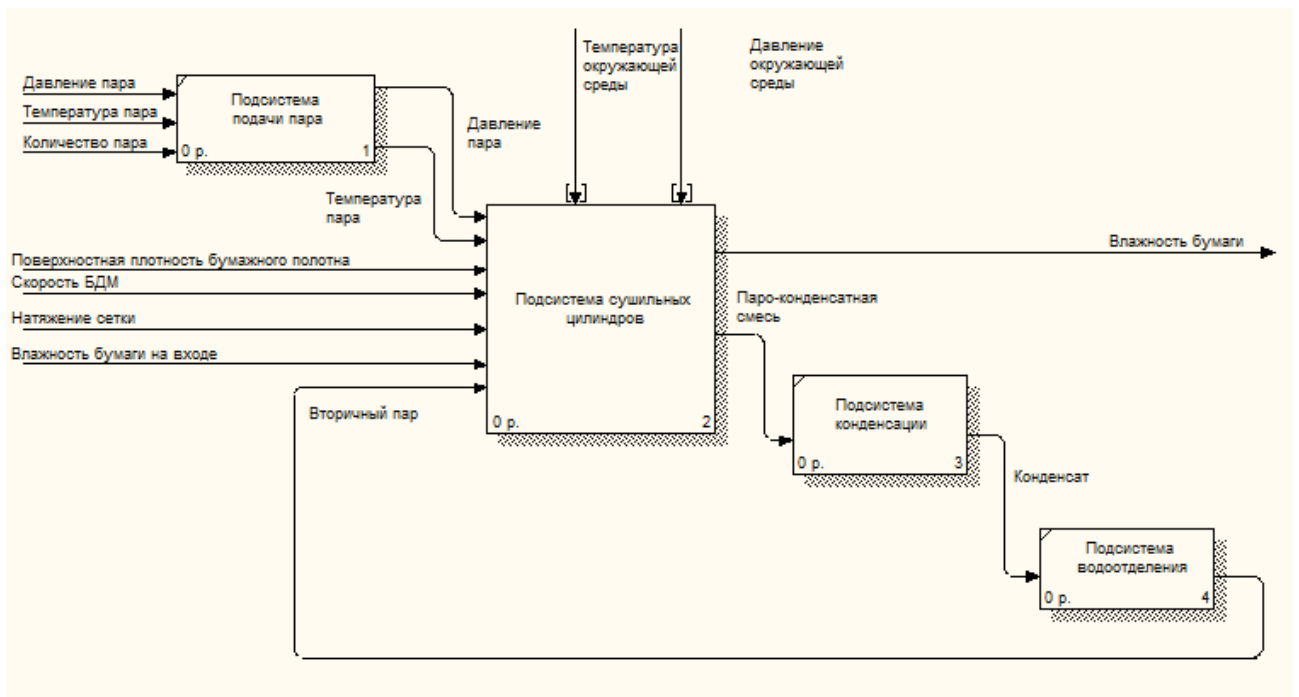


Рисунок 21 – Декомпозиция системы

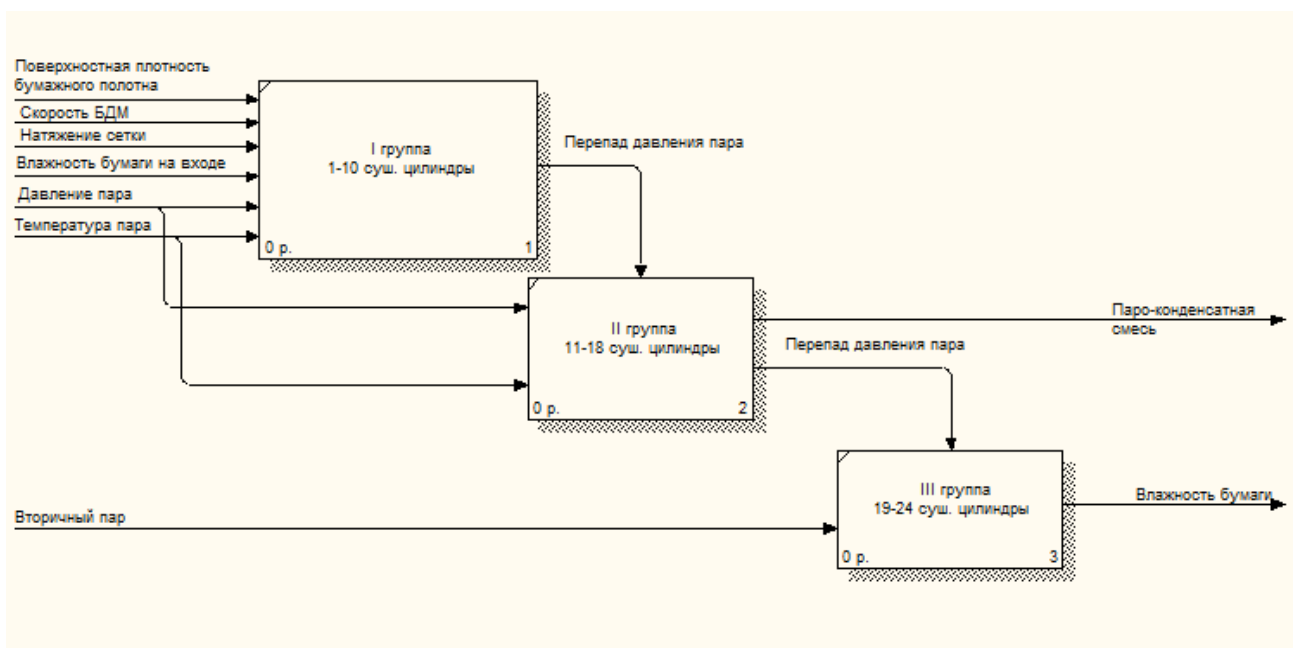


Рисунок 22 – Декомпозиция подсистемы сушильных цилиндров

В результате проведенной декомпозиции подсистемы сушильных цилиндров, состоящей из 24 цилиндров, поделенных на три группы, имеющие свое функциональное назначение, выявлено, что в первые две группы подается

острый пар, а в третью вторичный пар, оказывающий наибольшее влияние на регулирование выходного параметра влажности.

Далее рассмотрим структурную схему САУ:

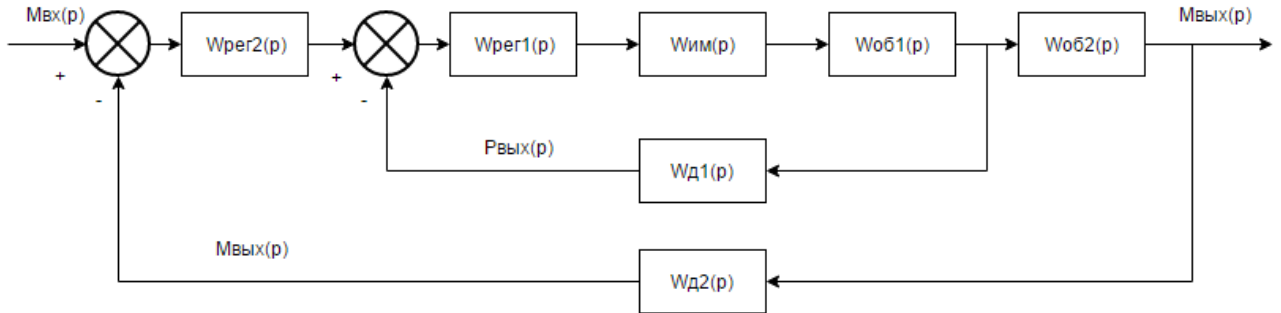


Рисунок 23 – Структурная схема САУ

Данную схему автоматизации регулирования, которая на рисунке 23, представим в следующем виде:

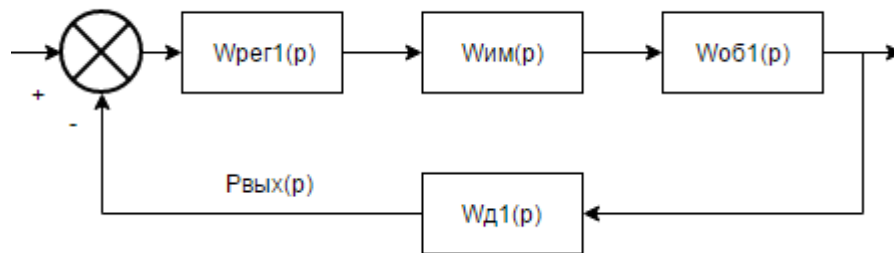


Рисунок 24 – Структурная схема внутреннего контура САУ влажности

На этой схеме представлены:

$W_{пер1}(p)$  – передаточная функция регулятора;

$W_{им}(p)$  – передаточная функция исполнительного механизма;

$W_{об1}(p)$  – передаточная функция объекта регулирования;

$W_{д}(p)$  – передаточная функция датчика.

Путем математических преобразований была получена передаточная функция исполнительного механизма, которая представлена ниже:

$$W_1(p) = \frac{1}{4p+1};$$

Передаточная функция объекта регулирования:

$$W_2(p) = \frac{10}{8p+1}.$$

Передаточная функция датчика:

$$W_3(p) = 1.$$

### 3.4 Построение модели системы в пакете MatLab

Проанализировав алгоритмическую схему регулирования, перейдем к структурной, модель которой построим в пакете Matlab как показано ниже:

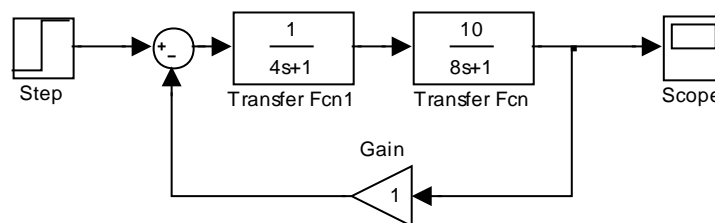


Рисунок 25 – Структурная схема САУ в модуле Simulink

### 3.5 Описание динамических характеристик САУ:

Построим временные характеристики:

а) Переходная характеристика звена – это реакция звена на единичный скачок. Находится по формуле:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} \quad (1)$$

где  $L^{-1}$  – оператор обратного преобразования Лапласа

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(s)}{s} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{10}{s(8s+1)} \right\} = 20e^{-\frac{t}{16}} \operatorname{sinh} \left( \frac{1}{16} t \right)$$

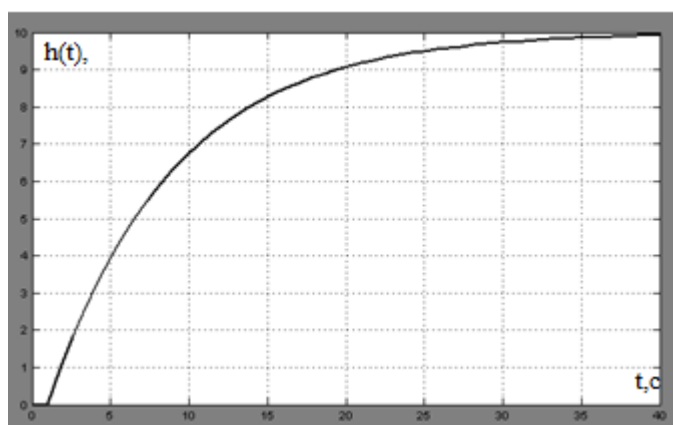


Рисунок 26 – Переходная характеристика элемента

б) Импульсная (весовая) характеристика – это реакция звена единичную импульсную функцию

$$k_3(t) = L^{-1} W(s) = \frac{5}{2} e^{-\frac{t}{8}}$$

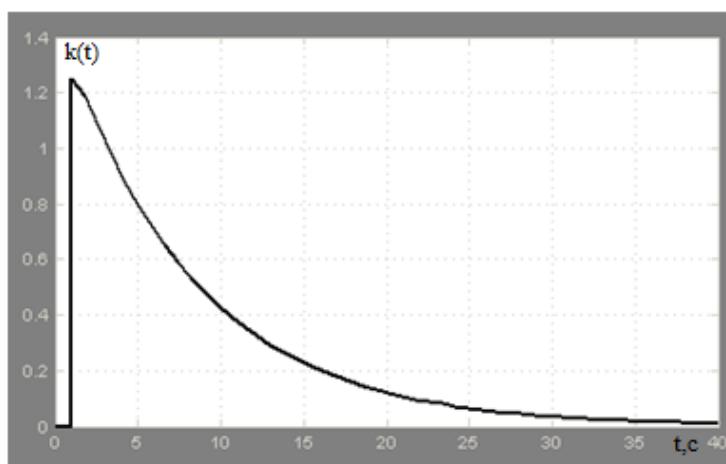


Рисунок 27 – Импульсная характеристика элемента

Далее рассмотрим частотные характеристики:

а) Представим передаточную функцию звена комплексной частотной передаточной функцией, заменив  $s$  на  $j\omega$  и получим, как представлено ниже:

$$W_3(s) = \frac{10}{(8s+1)} \rightarrow W_3(j\omega) = \frac{10}{(8j\omega+1)}$$

Образ  $W_3(j\omega)$  на комплексной плоскости – это амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) звена.

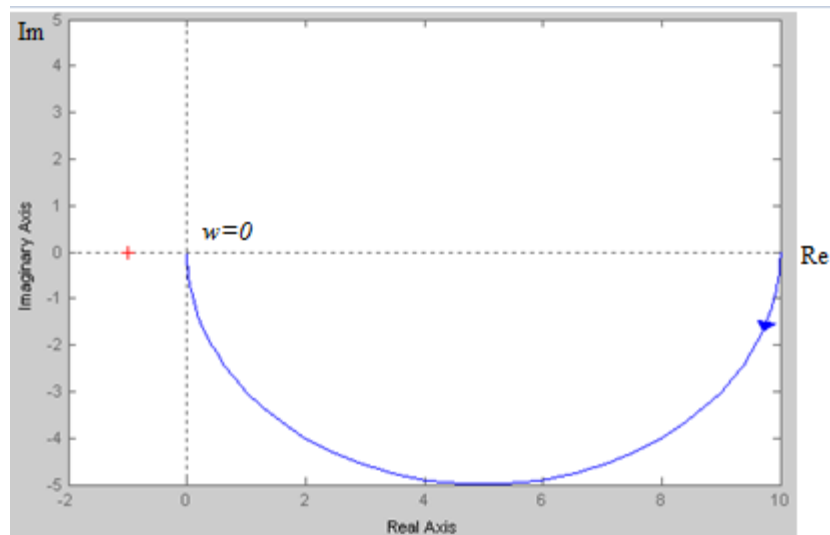


Рисунок 28 – АФЧХ элемента

б) ЛАЧХ системы

$$20 \lg K = 20 \lg 10 = 20;$$

Сопрягающая частота рассчитывается по формуле представленной ниже:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{4} = 0.25$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{8} = 0.125$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(T_1 \cdot \omega) - \arctg(T_2 \cdot \omega)$$

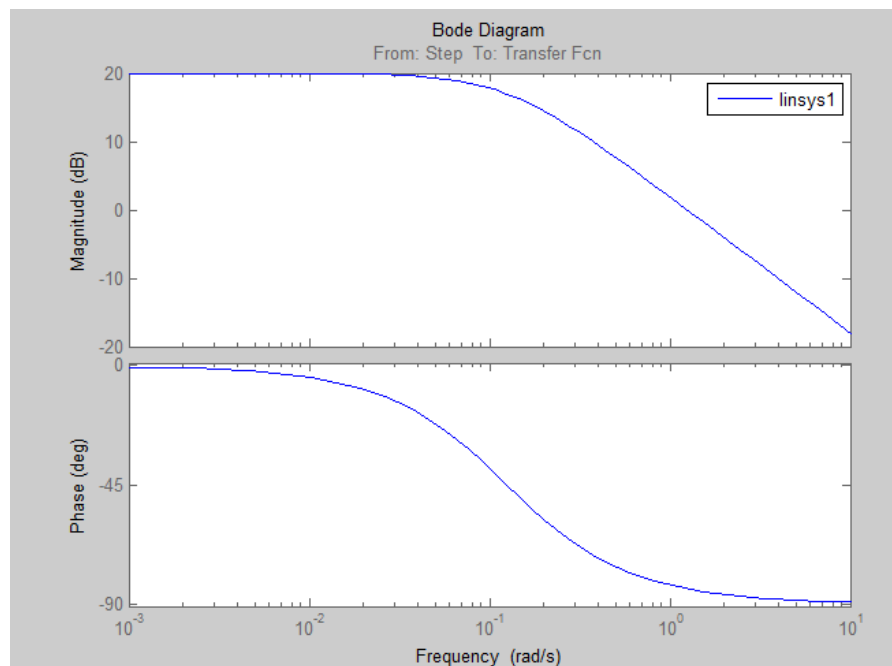


Рисунок 29 – График логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ)

### 3.6 Синтез САУ

Далее проведем синтез САУ. Передаточная функция объекта управления равна:

$$W_{Oy}(p) = W_1(p) * W_2(p) \quad (2)$$

$$W_{Oy}(p) = \frac{1}{4p+1} * \frac{10}{8p+1} = \frac{10}{32p^2+12p+1}.$$

#### 3.6.1. Расчет ПИД-регулятора

Передаточная функция ПИД-регулятора:

$$W_p(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p ,$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности,

$K_i$  – коэффициент интегрирующей части,

$K_d$  – коэффициент дифференцирующей части.

Определим передаточную функцию разомкнутой системы по формуле:

$$W_{раз}(p) = W_p(p) * W_{Oy}(p) \quad (3)$$

$$W_{раз}(p) = \left(K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p\right) * \frac{10}{32p^2 + 12p + 1} = \frac{10K_d p^2 + 10K_p p + 10K_i}{32p^3 + 12p^2 + 1}$$

Передаточную функцию замкнутой системы можно получить при помощи передаточной функции разомкнутой системы:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{раз}(p)}{1+W_{раз}(p)}, \quad (4)$$

$$W_{зам}(p) = \frac{10K_d p^2 + 10K_p p + 10K_i}{32p^3 + (10K_d + 12)p^2 + (10K_p + 1)p + 10K_i}.$$

Для нахождения коэффициентов регулятора, нужно записать характеристический полином замкнутой системы, которая равна знаменателю передаточной функции замкнутой системы:

$$D(p) = 32p^3 + (10K_d + 12)p^2 + (10K_p + 1)p + 10K_i \quad (5)$$

Метода синтеза основана на равенстве коэффициентов характеристического полинома замкнутой синтезируемой системы задаваемым коэффициентам, исходя из того, что эти коэффициенты должны быть, определены по задаваемым корням: все корни одинаковые и действительные. Поэтому, характеристический полином представим в виде:

$$\begin{aligned} D(p) &= \frac{32p^3 + (10K_d + 12)p^2 + (10K_p + 1)p + 10K_i}{32} = \\ &= p^3 + \left(\frac{5K_d}{16} + \frac{3}{8}\right)p^2 + \left(\frac{5K_p}{16} + \frac{1}{32}\right)p + \frac{5K_i}{16}. \end{aligned} \quad (6)$$

Задаваемый вид характеристического полинома замкнутой системы имеет вид:

$$p^3 + 3\eta * p^2 + 3\eta^2 + \eta^3 \quad (7)$$

где  $\eta$  - запас устойчивости.

Коэффициент интегрирования:

$$\frac{5K_i}{16} = \eta^3 \quad (8)$$

Отсюда:  $K_i(\eta) = \frac{16\eta^3}{5}$

Коэффициент пропорциональности:

$$\frac{5K_p}{16} + \frac{1}{32} = 3\eta^2 \quad (9)$$

Отсюда:  $K_p(\eta) = \left(3\eta^2 - \frac{1}{32}\right) * \frac{16}{5}$



Коэффициент дифференцирования:

$$\frac{5Kd}{16} + \frac{3}{8} = 3\eta \quad (10)$$

Отсюда:  $\left(3\eta - \frac{3}{8}\right) * \frac{16}{5}$

Коэффициенты регулятора при  $\eta = 2$ , будут равны:

$$K_p = 38.3.$$

$$K_i = 25.6;$$

$$K_d = 18;$$

Модель внутреннего контура САУ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 30.

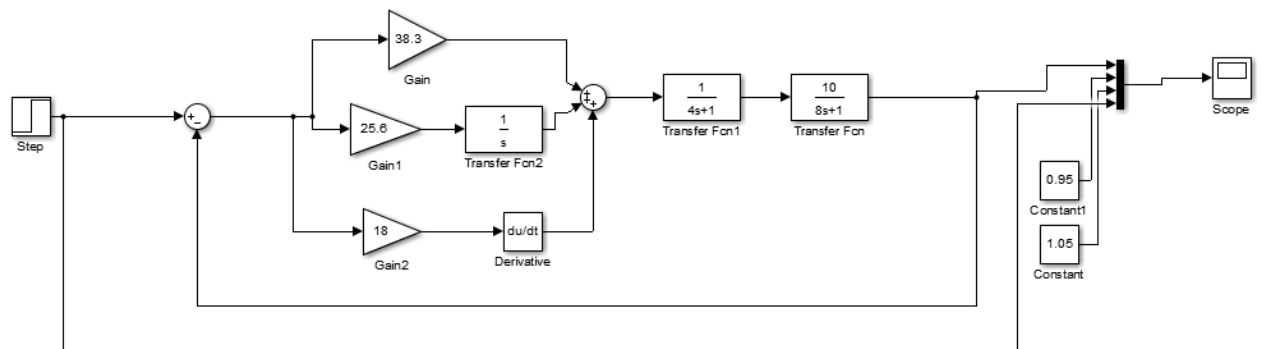


Рисунок 30 – Модель САУ с ПИД-регулятором при запасе устойчивости  $\eta = 2$

По переходной характеристике системы находим следующие показатели качества:

Время регулирования  $t_p = 3,4$  с.

Вычислим перерегулирование по формуле:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}}, \quad (11)$$

где  $h_{max} = 1,21$ ;

$$h_{уст} = 1;$$

$$\sigma = \frac{1,21 - 1}{1} * 100\% = 21\%$$

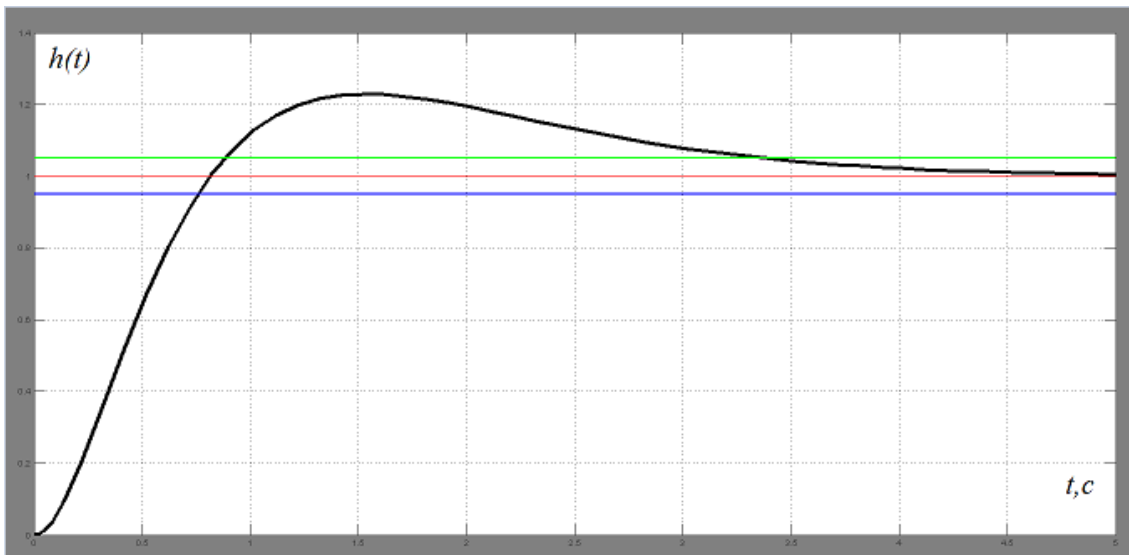


Рисунок 31 – Переходная характеристика САУ

Коэффициенты регулятора при  $\eta = 4$ , будут равны:

$$K_p = 153.5;$$

$$K_i = 204.8;$$

$$K_d = 37.2.$$

Модель системы САУ с ПИД-регулятором представлена на рисунке 32.

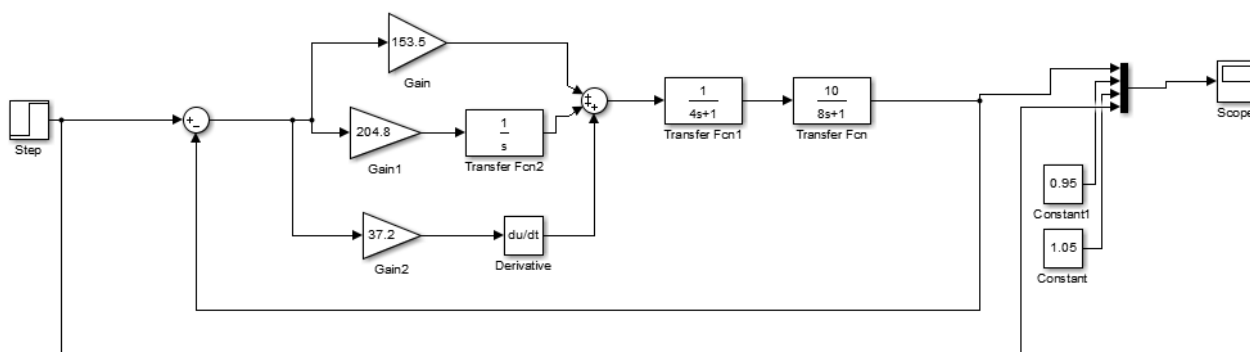


Рисунок 32 – Модель САУ с ПИД-регулятором при запасе устойчивости  $\eta = 4$

Переходная характеристика при измененных параметрах регулятора изображена на рисунке 33.

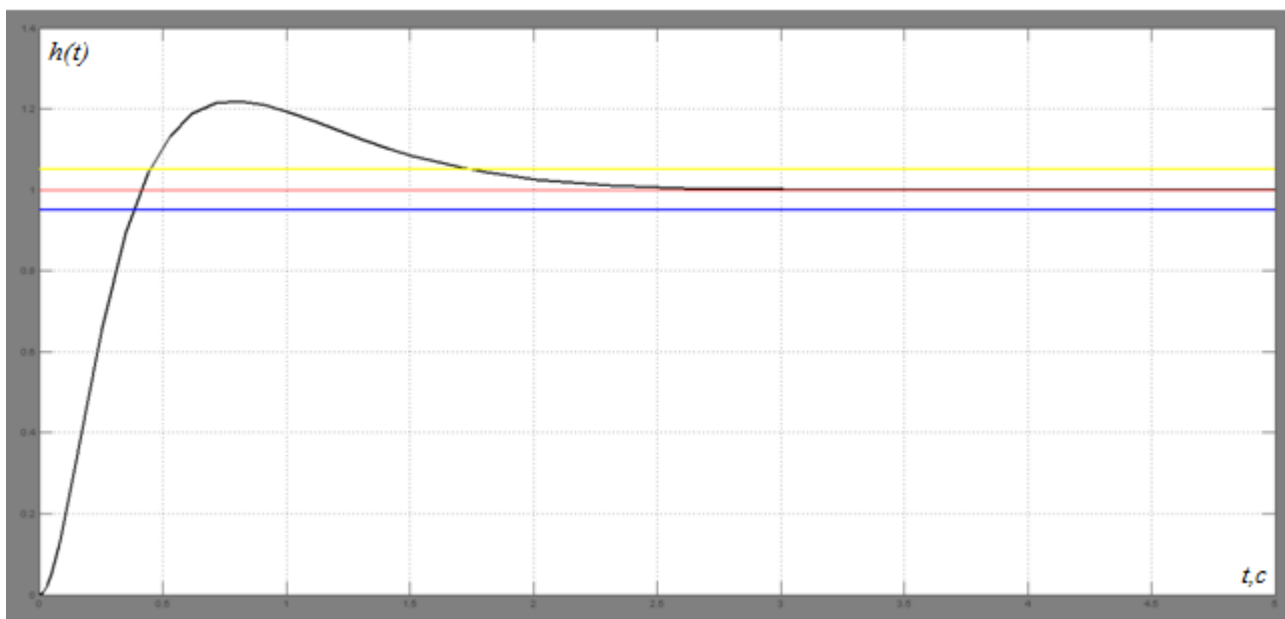


Рисунок 33 – Переходная характеристика САУ при измененных параметрах регулятора

Находим следующее:

Время регулирования  $t_p = 1,55$  с;

Вычислим перерегулирование по формуле (11):

$$h_{\max} = 1,21;$$

$$h_{\text{уст}} = 1;$$

$$\sigma = \frac{1,21 - 1}{1} * 100\% = 21\%$$

Таблица 16 – Сравнительная характеристика параметров САУ

Параметры САУ	САУ при $\eta = 2$	САУ при $\eta = 4$
Время регулирования, с	3,41	1,55
Время установления, с	1	1
Перерегулирование, %	21	21

Согласно расчетам при запасе устойчивости  $\eta = 4$  параметры САУ улучшились.

### 3.7 Выводы по 3 главе

1) Построением модели системы сушильной части БДМ в виде «черного ящика» определили входные и возмущающие воздействия, влияющие на выходной параметр – влажность бумаги.

2) Созданием модели состава системы сушильной части БДМ выделили четыре подсистемы, декомпозиция модели и подсистемы сушильных цилиндров, показала, что влажность необходимо регулировать давлением вторичного пара на выходе бумаги после 3 группы сушильных цилиндров.

3) В результате была определена каскадная двухконтурная система автоматического регулирования влажности, через измерения параметра давления вторичного пара.

4) Построенная модель в приложении Matlab в модуле Simulink позволила рассмотреть временные характеристики элементов внутреннего контура САУ.

5) Рассчитанные коэффициенты ПИД-регулятора, коэффициент пропорциональности, интегрирования, дифференцирования позволили определить в системе время регулирования – 3,41с, время установления – 1с, перерегулирование 21%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сушильная часть бумагоделательной машины является одной из основных в технологическом процессе изготовления гофрированной бумаги. Для сушки тонкого листового материала бумаги применяется контактный метод, при котором тепло, необходимое для нагрева материала и испарения из него влаги, непосредственно передается от горячей поверхности сушильных цилиндров, обогреваемых паром. Существующая система автоматизации поддерживает технологический режим сушки для повышения эффективности работы сушильной части в соответствии с функциональной схемой.

В данной работе была построена модель в виде «черного ящика» для выявления входных параметров и возмущающих воздействий процесса сушки бумаги. Рассмотрена модель состава сушильной системы бумагоделательной машины, в которой были выделены четыре основных подсистемы: подачи пара, сушильных цилиндров, конденсации и водоотделителей. Проведенная декомпозиция подсистемы сушильных цилиндров, состоящая из 24 цилиндров, поделенных на три группы, имеющие свое функциональное назначение, в первые две группы подается острый пар, а в третью вторичный пар, оказывающий наибольшее влияние на регулирование выходного параметра влажности. На основе анализа функциональной схемы регулирования влажности построена модель в математическом приложении MatLab модуле Simulink для определения переходных процессов САУ. Были рассчитаны коэффициенты ПИД-регулятора для определения параметров качества внутреннего контура каскадной системы регулирования влажности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов, С.Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов; 2-е изд. перераб. – Москва: Лесная промышленность, 2007 – 698с.
2. ГОСТ 73775-85 Бумага для гофрирования. Метод определения сопротивления плоскостному сжатию гофрированного образца (СМТ) – Введ. 01.01.1985. – Москва, Стандартинформ, 1985 – 15с.
3. Фляте, Д. М. Технология бумаги / Д.М. Фляте – Москва: Лесная промышленность, 1988 – 440с.
4. Красников, В. В. Контактная сушка / В.В. Красников – Москва: Энергия, 1973 -
5. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – Москва: Энергия, 1968 – 472с.
6. Гринченко, И.А. Совершенствование систем управления процессом сушки бумаги / И.А.Гринченко, В.В.Пожитков, Ю.С.Жукова // Целлюлоза. Бумага. Картон , 2009 – 81с.
7. Разработка и внедрение комплексных решений [Электронный ресурс] : Компактные контроллеры – Режим доступа: <http://www.rivkora.ru/fx3u-enet.html>
8. Разработка и внедрение комплексных решений [Электронный ресурс] : Модули удаленного сбора данных – Режим доступа: <http://www.rivkora.ru/moduli-udalennogo-sbora-dannykh.html>
9. Комания «Эмерсон» [Электронный ресурс] : каталог интеллектуальных датчиков давления данных – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/news/pr/PublishingImages/Metranatom.pdf>
10. Комания «Эмерсон» [Электронный ресурс] : каталог вихревых счетчиков – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ru-ru/brands/metran/products/flow/vortex/332/pages/index.aspx>
11. Комания «Эмерсон» [Электронный ресурс]: Датчики гидростатического уровня – Режим доступа: <http://www.emerson.com/documents/automation/61840.pdf>

12. Компания «Самсон» [Электронный ресурс]: Регулирующие органы–  
Режим доступа: <https://www.emerson.com/documents/automation/61888.pdf>
13. Инфракрасный измеритель влажности и массы [Электронный  
ресурс]: Режим доступа – <http://pmik.petsu.ru/pub/konf6disk/present/akvar.pdf>
14. Проектирование подсистемы АСУ сушильной частью БДМ ОАО  
«ПЗБФ» [Электронный ресурс]: Режим доступа -  
[http://stud.wiki/manufacture/3c0b65625b3bd78b4d43b88521316c37\\_1.html](http://stud.wiki/manufacture/3c0b65625b3bd78b4d43b88521316c37_1.html)
15. Пилиневич, Л.П. Общая теория систем: методические указания для  
студ. заоч. формы обуч. по спец. 1-58 01 01 – «Инженерно-психологическое  
обеспечение информационных технологий» / Л.П. Пилиневич, К.Д. Яшин –  
Минск.: БГУИР, 2012 – 31с.
16. Анфилатов В.С Системный анализ в управлении: Учебное пособие /  
В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин / под ред. А.А. Емельянова –  
Москва: Финансы и статистика, 2012 – 368с.
17. Бесекерский, Теория систем автоматического регулирования / В.А.  
Бесекерский, Е.П. Попов – Москва: Наука, 1972 – 72с.
18. Лапыгин, Ю.Н. Теория организации: учебное пособие / Ю.Н.  
Лапыгин – Москва, Инфа-М, 2007 – 322с.
19. Суриков, В.Н. Автоматизация технологических процессов и  
производств. Учебно-методическое пособие. Часть 1 / В.Н. Суриков, Г.П.  
Буйлов – Санкт – Петербург, 2011 – 168с.
20. СТО 4.2 07 2014. Система менеджмента качества. Общие требования к  
построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. –  
Взамен СТО 4.2 07 2012; дата введ. 30.12.2013. – Красноярск, 2013. – 60с.