

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

**(БГТУ им. В.Г. Шухова)**

Институт энергетики, информационных технологий и управляющих систем

Кафедра электроэнергетики и автоматики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы Электропривод и автоматика

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

на тему:

Исследование способов регулирования влажности с построением  
информационной SCADA-системы

Студент \_\_\_\_\_ Пономарев Илья Эдуардович

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ канд. техн. наук, доц. Белоусов А.В.

Руководитель \_\_\_\_\_ канд. техн. наук, доц. Лимаров А.И.

**К защите допустить**

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ /Белоусов А.В./

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**Белгород 2021 г.**

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

**(БГТУ им. В.Г. Шухова)**

Институт энергетики, информационных технологий и управляющих систем

Кафедра электроэнергетики и автоматики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы Электропривод и автоматика

Утверждаю:

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Белоусов А.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ЗАДАНИЕ**

на выпускную квалификационную работу студента

\_\_\_\_\_  
Пономарева Ильи Эдуардовича

1. Вид выпускной квалификационной работы (ВКР) \_\_\_\_\_ бакалаврская работа

2. Тема ВКР: Исследование способов регулирования влажности с построением  
информационной SCADA-системы

утверждена приказом по университету от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. № \_\_\_\_\_

3. Срок сдачи студентом законченной ВКР \_\_\_\_\_ года.

4. Исходные данные лабораторный стенд для регулирования уровня влажности

5. Содержание ВКР (перечень подлежащих разработке разделов)

1) Краткое описание технологического процесса и лабораторного стенда

2) Расчет двигателя и моделирование характеристик частотного электропривода вентилятора

3) Разработка ПО MasterSCADA для регулирования уровня влажности с помощью лабораторного  
стенда

6. Электронная презентация

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Задание выдал (подпись, дата)	Задание принял (подпись, дата)

Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

№ п/п	Наименование этапов работы	Срок выполнения этапов работы	Примечание
1	Выбор темы будущей ВКР	22.03.21	Выполнено
2	Постановка задач	23.03.21	Выполнено
3	Обсуждение и выбор необходимого ПО	24.03.21	Выполнено
4	Изучение программы MasterSCADA	25.03.21-3.04.21	Выполнено
5	Написание программы для стенда по регулированию уровня влажности	4.04.21-15.04.21	Выполнено
6	Подключение компьютера к стенду и установка соединения через OPC сервер	16.04.21-23.04.21	Выполнено
7	Отладка программы MasterSCADA для стенда	24.04.21-27.04.21	Выполнено
8	Получение графиков изменения влажности	28.04.21	Выполнено
9	Написание выпускной квалификационной работы	29.04.21-8.06.21	Выполнено

Студент \_\_\_\_\_ Пономарев Илья Эдуардович

Руководитель \_\_\_\_\_ канд. техн. наук, доц. Лимаров А.И.

**«Результаты проверки ЭВ ВКР на заимствование»**

Ф 02(СК-ПП-46.04-15)

Кафедра электроэнергетики и автоматики

Студент Пономарев И.Э.

ЭА-43

Тема ВКР «Исследование способов регулирования влажности с построением информационной SCADA-системы»

ВКР прошла проверку на объем заимствований.

Итоговая оценка оригинальности: \_\_\_\_\_

Работу проверил \_\_\_\_\_ Ханзаров А.С.

Руководитель

ВКР канд. техн. наук, доц.

Лимаров А.И.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВЛАЖНОСТИ .....	8
1.1. Виды управления влажностью .....	8
1.2. Классификация систем управления.....	12
1.3. Описание автоматизируемой системы.....	17
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ.....	25
2.1. Расчет параметров схемы замещения.....	25
2.2. Построение функциональной и структурной схем системы регулирования влажности для частотного электропривода вентилятора....	30
2.3. Моделирование динамических и статических процессов в системе регулирования влажности для частотного электропривода вентилятора....	31
3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	39
3.1. Построение характеристик вентилятора.....	39
3.2. Исследование способов регулирования.....	47
3.3. Сравнение энергетических характеристик регулирования.....	50
4. РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА.....	53
4.1. Подключение ПЧ INNOVERT ISD mini к Owen OPC Server .....	53
4.2. Подключение ТРМ101 к Owen OPC Server.....	56
4.3. Разработка программы для ПЧ INNOVERT ISD mini в MasterSCADA.....	59
4.4. Разработка программы для ТРМ101 в MasterSCADA.....	70
4.5. Создание мнемосхемы для лабораторного стенда.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	81

					<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>			<i>Исследование способов регулирования влажности с построением информационной SCADA-системы</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>					5	82
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сидирцева Н.Б.</i>				<i>БГТУ им. В.Г. Шухова</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>				<i>ЭА-43</i>		

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей в любом производстве является экономия ресурсов и повышение энергосбережения. Применение системы плавного пуска и преобразователя частоты в электроприводе полностью решает проблему пуска электропривода, обеспечивает экономию ресурса электродвигателя и приводимого им механизма, устраняет негативное влияние процесса пуска на питающую электропривод сеть. Кроме того, применение частотно регулируемого электропривода обеспечивает автоматическое регулирование скорости вращения электродвигателя в функции технологического параметра.

Экономическое обоснование применения преобразователя частоты в регулируемом электроприводе весьма актуально. А создание методики изучения в учебном процессе, с целью ответа на вопрос: для каких систем и в каких случаях полученная экономия электроэнергии будет оправдана и окупит затраты на приобретение и установку преобразователей частоты, имеет практическую значимость.

Этому и посвящена моя выпускная квалификационная работа, которая привязана к созданию учебного стенда, на котором студенты в процессе обучения будут проводить аналогичные исследования.

Это исследование мы проводим на примере регулирования влажности.

Несомненно, система регулирования влажности является одним из важнейших аспектов в работе большинства предприятий и производств. Большое внимание этому процессу уделяется в теплицах для выращивания растений; пищевой промышленности; увлажнение воздуха также необходимо в типографиях; в деревообрабатывающей и мебельной промышленности содержание влаги в древесине напрямую связано с температурой и уровнем влажности в помещении; в

					<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>			<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>				6	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сибирцева Н.Б.</i>			<i>БГТУ им. В.Г. Шухова</i> <i>ЭА-43</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>					

текстильной промышленности уровень влажности тканей напрямую связан с усилением прочности на разрыв натуральных волокон и уменьшением количества брака; увлажнение воздуха в сельском хозяйстве также играет важную роль. И самое главное, дополнительное увлажнение воздуха на фирме благоприятно сказывается на самочувствии персонала.

Стабилизация влажности, а также управление влажностью - распространенный технологический процесс, который состоит из увлажнителя и исполнительного механизма вентилятора, заслонки или ПЧ.

Правильно выбранная технология поддержания оптимальной влажности - одна из важнейших составляющих, а эффективное использование энергоресурсов - дополнительная возможность существенно уменьшить себестоимость производимой продукции [1].

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что данная тема выпускной квалификационной работы является особенно актуальной и значимой.

Объект исследования данной выпускной квалификационной работы - автоматизированная система регулирования влажности.

Предмет исследования - лабораторный стенд для измерения и регулирования влажности.

Целью является сравнение двух методов регулирования влажности: с помощью преобразователя частоты и с помощью управляемой дроссельной заслонки.

Задачи, которые ставились при написании данной ВКР заключались в получении регулировочных характеристик для двух методов регулирования.

При написании выпускной квалификационной работы были применены следующие методы исследования: моделирование, расчет, измерение, сравнение и анализ.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

# 1. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВЛАЖНОСТИ

## 1.1. Виды управления влажностью

Регулирование влажности может производиться при помощи дроссельной заслонки или преобразователя частоты [4].

Использование частотного преобразователя позволяет обеспечить подачу питания с необходимыми параметрами на любые виды электрических двигателей рабочего оборудования. В зависимости от модели преобразователя частоты рассчитаны на работу в однофазной или трехфазной сети переменного тока различного напряжения стандартной частоты 50-60Гц. На выходе устройства возможно получение тока измененной частоты с аналогичными или измененными показателями напряжения (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Преобразователь частоты

Также преобразователи частоты могут использоваться для обеспечения дополнительной защиты рабочего двигателя от скачков напряжения, внешних помех и выполнения других защитных функций. Различные модели частотных преобразователей могут включать в себя дополнительные устройства, в том числе

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Пономарев И.Э.			Методы регулирования уровня влажности	Лит	Лист	Листов
Провер.		Лимаров А.И.					8	17
Н. Контр.		Сибирцева Н.Б.				БГТУ им. В.Г. Шухова ЭА-43		
Чтверд.		Белоусов А.В.						



ПИД-регулятор, ПЛК, тормозной резистор и другие. Благодаря этому можно с помощью одного преобразователя заменить несколько устройств.

Преобразователи частоты выпускаются в различных вариантах, подходящих для решения разнообразных промышленных задач. Как правило, производители предлагают несколько вариантов исполнения: для общепромышленного применения и специальные модели, например, для вентиляционного оборудования, насосов, автоматических дверей, лифтов и т.д. Это позволяет обеспечить широкие возможности эксплуатации частотных преобразователей.

Преобразователи применяются для регулирования частоты работы электродвигателей различного промышленного оборудования:

- насосные и компрессорные установки, вентиляторы в системах водоснабжения, водоотведения, подачи воды, других жидкостей, воздуха, в системах вентиляции и кондиционирования, отопления зданий и помещений;
- шнеки, конвейерные ленты, транспортеры и другое оборудование для перемещения продуктов и материалов;
- лифтовое оборудование;
- центрифуги;
- автоматические двери, ворота, рольставни;
- дозаторы, экструдеры, мельницы;
- буровые установки;
- обрабатывающие станки и многие другие.

Управление воздушным потоком без ПЧ в контуре осуществляется с помощью заслонок воздуховодов.

Дроссельная заслонка — механический регулятор проходного сечения канала, изменяющий количество протекающей в канале среды — жидкости или газа. Электровентиляторы работают с максимальной производительностью и постоянной скоростью, вне зависимости от того, какой объем воздуха требуется

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

прокачать. Энергопотребление в такой системе будет одинаково высоким, а износ механизмов ускоренным (рис. 1.2).

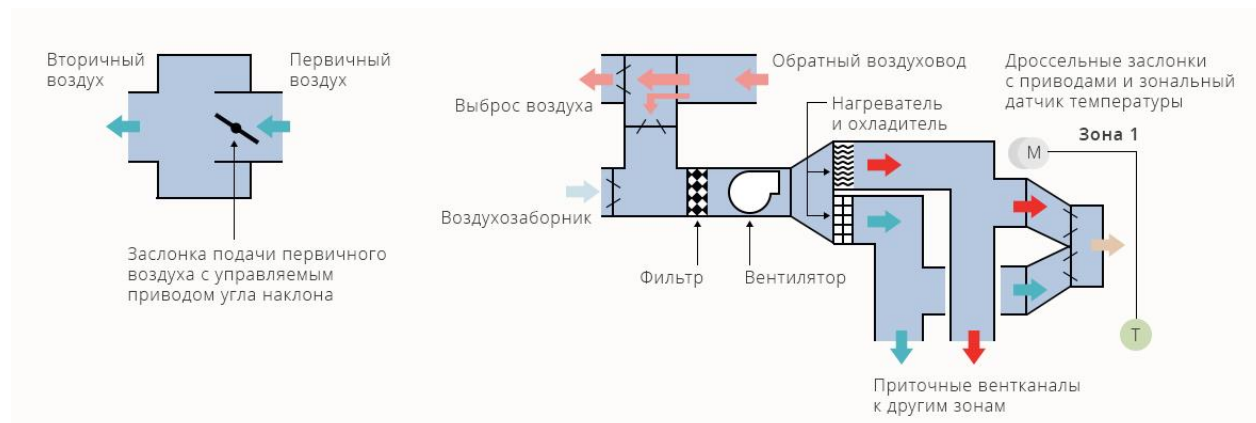


Рис. 1.2. Управление воздушным потоком без ПЧ

Преобразователи частоты позволяют наладить воздухообмен с наименьшими затратами, уменьшают износ оборудования и удлиняют сервисные интервалы. Они меняют характеристики частоты и/или напряжения питающего тока и мягко регулируют производительность электровентиляторов.

В схеме управления с ПЧ электродвигатель вентилятора нужно подключать через преобразователь. По сигналу датчиков давления и температуры прибор может изменять скорость вращения лопастей, плавно разгонять или останавливать вентилятор.

Таким образом, электродвигатель функционирует в щадящем режиме, а это существенно увеличивает его ресурс и исключает ударные нагрузки на электросеть. Оборудованию реже нужен ремонт, время простоя сокращается. Экономия электроэнергии составляет 20–40%, в зависимости от режима и условий работы (рис. 1.3).

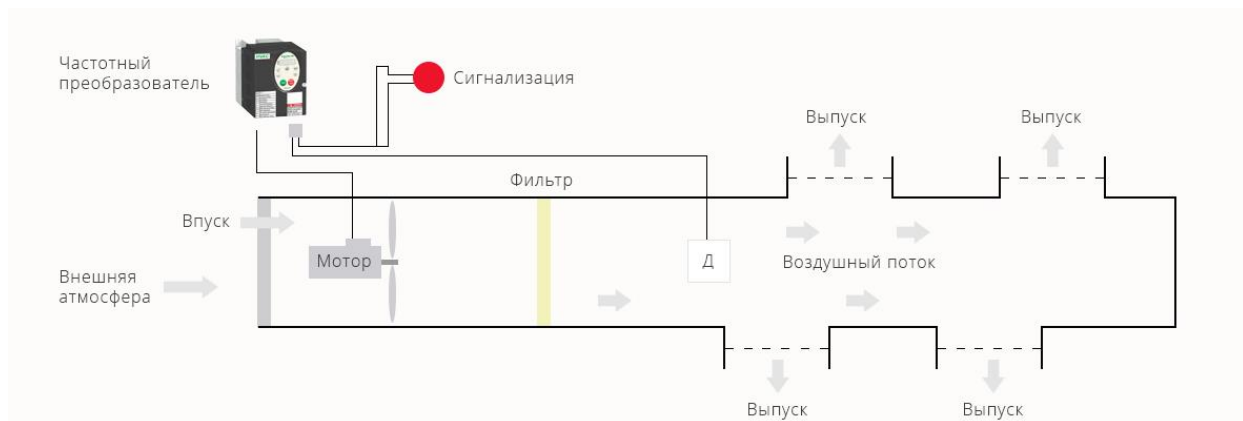


Рис. 1.3. Управление воздушным потоком с ПЧ

Современные преобразователи частоты — это высокотехнологичные интеллектуальные приборы с микропроцессорным управлением. Благодаря multifunctionality их можно использовать во всех типах вентиляционных систем:

1) Общеобменная вентиляция для всех помещений объекта. Один ПЧ может управлять согласованной работой двух контуров — вытяжки и приточки.

2) Система дымоудаления с нагнетанием чистого воздуха в контрольные зоны (в местах скопления людей). При пожаре ПЧ синхронно регулирует разряженное и избыточное давление.

3) Приточная вентиляция со стабильной производительностью. ПЧ контролирует заданные параметры, защищает электродвигатель и связывает оконечное оборудование с централизованным автоматическим контуром управления.

4) Приточная многозональная вентиляция с переменной производительностью. С ПЧ отпадает необходимость регулировать поток заслонками. Это упрощает и удешевляет систему. При этом прибор может задавать индивидуальные режимы работы вентиляторов в каждом помещении.

5) Местная вытяжка. ПЧ регулирует производительность оборудования в соответствии с настройками или по сигналам с датчиков.

б) Рециркуляционная вентиляция. ПЧ отвечает за соотношение поступающего и удаляемого воздуха, по мере необходимости изменяя скорость вращения соответствующих электровентиляторов.

7) Рекуперационная система. ПЧ управляет роторным рекуператором, автоматически регулирует его производительность при изменении температуры воздуха.

Применение ПЧ для управления работой вентиляторов имеет много плюсов. Некоторые из них:

- Снижается потребление электричества.
- Плавный пуск, благодаря которому нет динамического удара.
- Нет перегрузок при включении обратного хода.
- Автоматизируются и упрощаются процессы управления.

Из минусов — относительно высокая стоимость приобретения. Однако она быстро окупается за счет экономии электричества и снижения эксплуатационных расходов.

Также прибор необходимо предварительно настроить.

## 1.2. Описание автоматизируемой системы

В данной ВКР стоит задача разработать ПО для стенда кафедры ЭиА БГТУ им. В.Г. Шухова. Он необходим для выполнения лабораторных работ студентами кафедры, в ходе их выполнения студенты смогут наглядно понять принципы регулирования влажности и оценить их преимущества и недостатки. На рис. 1.4 приведено изображение разработанного лабораторного стенда для регулирования влажности.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12



Рис. 1.4. Изображение лабораторного стенда

На рис. 1.5 приведена схема разработанного лабораторного стенда.

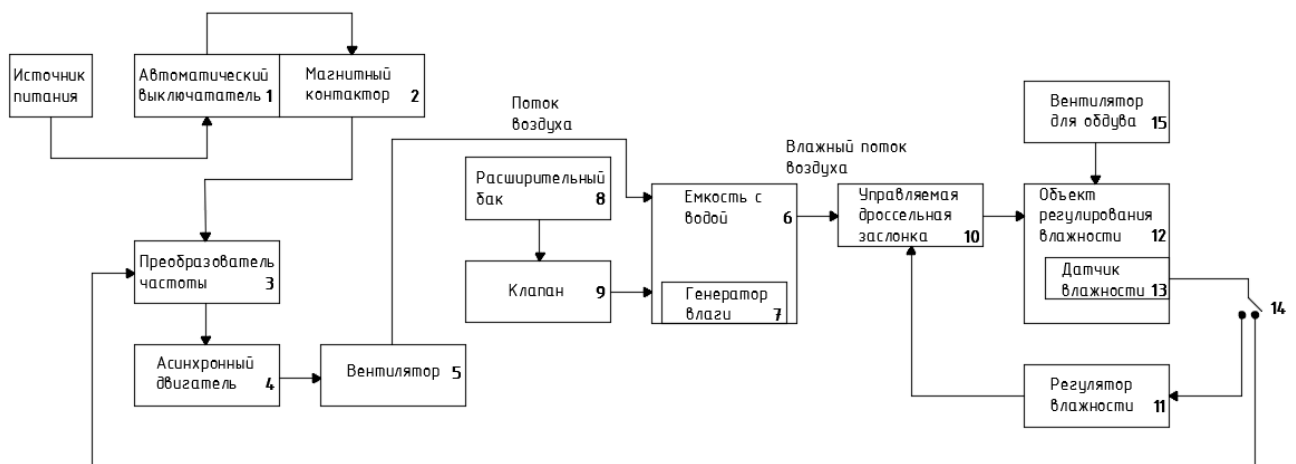


Рис. 1.5. Схема лабораторного стенда

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

В стенде реализована управляющая система регулирования влажности, которая состоит из:

1) Автоматический выключатель АВВ SH203L. Он предназначен для защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий в линиях кабелей, электродвигателях, систем освещения, а также розеточных линий. Они имеют два различных механизма отключения: механизм термического отключения с задержкой для защиты от перегрузки и механизм электромеханического отключения для защиты от короткого замыкания.

2) Магнитный контактор КМИ-10910 относится к серии малогабаритных магнитных контакторов производства ИЭК и предназначен для включения, выключения электродвигателей и другого электрооборудования при подаче управляющего напряжения на концы магнитной катушки контактора.

3) Преобразователь частоты ISD251M43B фирмы Innovert. Трехфазный преобразователь частоты INNOVERT ISD251M43B использует скалярный метод управления электродвигателем. Выходная мощность устройства — 1,5 кВт. Выходной ток — 1,2 А. Устройство оснащено четырехразрядным дисплеем для отображения настроек и параметров работы. Класс защиты — IP20.

4) Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АИР-56А2-У2. АИР56А2 - это асинхронный электродвигатель 0,18 кВт 3000 об/мин. Трехфазный общепромышленный магнитоэлектрический двигатель с короткозамкнутым ротором. Паспортная частота вращения 2700 оборотов, мощность - 0,18 кВт, частота вращения поля статора - 3000 об/мин. Питание - 220/380 Вольт 50 Гц. Универсальные крепежные размеры по ГОСТ 31606-2012. Диаметр вала - 11 мм • IP55 • КПД - 65,7%. АИР56А2 применяется для привода механического промышленного оборудования - редукторов, кранов, маломощных вентиляторов, измельчителей, пил, станков, насосов, древоколов, компрессоров, дробилок.

5) Вентилятор нагнетающий представлен центробежным вентилятором улиткой. Центробежный (радиальный) вентилятор иногда называют вентилятором-

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

улиткой из-за внешнего сходства корпуса вентилятора и раковины улитки. Кроме того, улиткой центробежного вентилятора называют его корпус.

Принцип действия центробежного вентилятора заключается в том, что рабочее колесо разгоняет воздух в направлении от центра к краям. Для того чтобы воздух выходил наружу, внешний край корпуса вентилятора (если смотреть со стороны всасывающего отверстия) сделан в форме витка спирали. В месте разрыва витка находится напорное отверстие, направленное по касательной в сторону вращения рабочего колеса.

В нашем случае управление вентилятором осуществляется с помощью преобразователя частоты по законам ПИД регулирования. Для насосов и вентиляторных установок рекомендуется выключать дифференциальную составляющую [15].

6) Емкость №1, которая необходима для генерации водяного пара и его перемещения с помощью потоков сухого воздуха из вентилятора к управляемой дроссельной заслонке.

7) Ультразвуковой генератор тумана Mist Maker. Принцип работы основан на ультразвуковом дроблении воды в туман. Активным элементом ультразвукового генератора тумана служит пьезокерамический ультразвуковой излучатель 1,7 МГц Ф-20 мм.

8) Расширительный бак, в котором находится вода для долива в емкость №2.

9) Клапан, осуществляющий регулируемый долив из расширительного бака в емкость №2.

10) Управляемая дроссельная заслонка регулирует поступление водяного пара из емкости №1 в емкость №2.

11) Регулятор влажности ОВЕН ТРМ101 - ПИД-регулятор температуры, давления или других физических величин в различных технологических процессах. ОВЕН ТРМ101 осуществляет контроль управляемой дроссельной заслонкой по

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

законам ПИД-регулирования, предназначен для точного поддержания заданных параметров. Используется в составе сложного технологического оборудования.

Прибор ОВЕН ТРМ101 осуществляет ПИД-регулирование измеренной величины, управляя "нагревателем" или "холодильником". Настройка коэффициентов ПИД-регулятора на объекте осуществляется автоматически (автонастройка).

Терморегулятор ОВЕН ТРМ101 управляет нагрузкой одним из двух методов:

- импульсным (если выход ПИД-регулятора – э/м реле, транзисторная оптопара, симисторная оптопара, выход для управления внешним твердотельным реле);

- аналоговым (если выход ПИД-регулятора – ЦАП 4...20 мА или 0...10 В).

12) Емкость №2 имитирует объект, в котором происходит регулирование уровня влажности.

13) Датчик относительной влажности воздуха SH Z51P5-32P-LP-4. Служит для контроля и непрерывного преобразования влажности воздуха в аналоговый выходной сигнал напряжения или тока.

В датчиках в качестве первичного преобразователя влажности и температуры используется чувствительный элемент на емкостном принципе действия. Окружающий воздух к ЧЭ поступает через фильтр датчика. Данные о влажности и температуре воздуха с ЧЭ в цифровом виде поступают в микропроцессор для обработки, и, далее преобразуются в выходной сигнал, пропорционально измеренной влажности и температуре.

14) Переключатель, осуществляющий переход их режима считывания влажности с помощью ПЧ в режим считывания влажности с помощью ТРМ101.

15) Вентилятор на обдув колбы осуществляет имитацию возмущения потока воздуха в емкости №2.



### 1.3. Классификация систем управления

1) Система ППЧ-АД отображена на рис. 1.6.

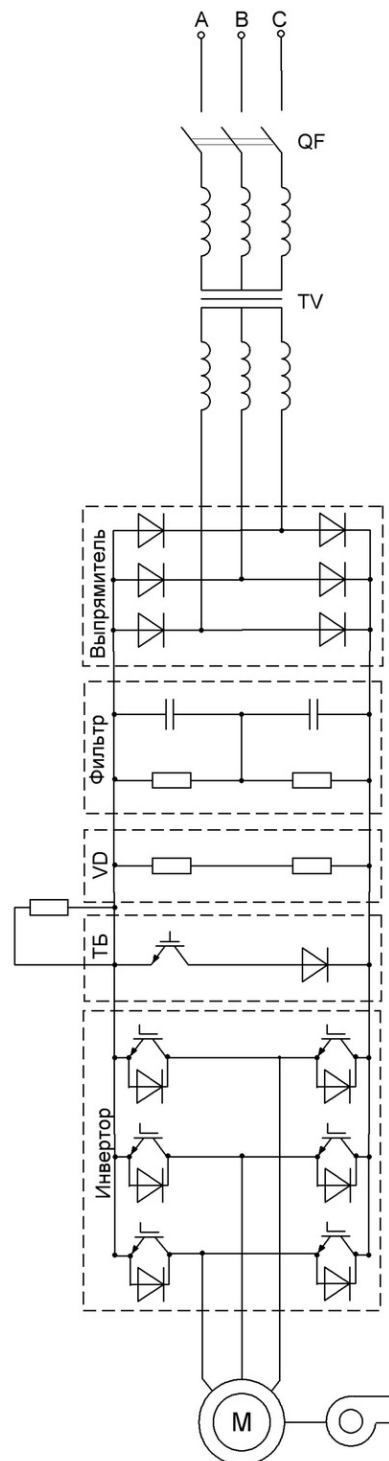


Рис. 1.6. Схема системы ППЧ-АД

С помощью преобразователей частоты успешно выполняется регулировка пусковых токов, с возможностью контроля и ограничения их величины до нужных

значений. Для правильного использования данной аппаратуры необходимо знать принцип работы частотного преобразователя для асинхронного двигателя. Его применение позволяет существенно увеличить срок службы оборудования и снизить потери электроэнергии. Электронное управление, кроме мягкого пуска, обеспечивает плавную регулировку работы привода в соответствии с установленным соотношением между частотой и напряжением.

Основной функцией частотных преобразователей является плавная регулировка скорости вращения асинхронных двигателей. С этой целью на выходе устройства создается трехфазное напряжение с переменной частотой.

Преобразователи частоты нередко называются инверторами. Их основной принцип действия заключается в выпрямлении переменного напряжения промышленной сети. Для этого применяются выпрямительные диоды, объединенные в общий блок. Фильтрация тока осуществляется конденсаторами с высокой емкостью, которые снижают до минимума пульсации поступающего напряжения. В этом и заключается ответ на вопрос для чего нужен частотный преобразователь.

В качестве управляющего элемента данной системы выступает преобразователь частоты, основной функцией которого является изменение частоты питающего напряжения. Его конструкция выполнена в виде статического электронного узла, а формирование переменного напряжения с заданной изменяемой частотой осуществляется на выходных клеммах. Таким образом, за счет изменения амплитуды напряжения и частоты регулируется скорость вращения электродвигателя [7].

Управление асинхронными двигателями осуществляется двумя описанными ниже способами [10]:

1. Скалярное управление действует в соответствии с линейным законом, согласно которому амплитуда и частота находятся в пропорциональной зависимости между собой. Изменяющаяся частота приводит к изменениям

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

амплитуды поступающего напряжения, оказывая влияние на уровень крутящего момента, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности агрегата. Следует учитывать зависимость выходной частоты и питающего напряжения от момента нагрузки на валу двигателя. Для того чтобы момент нагрузки был всегда равномерным, отношение амплитуды напряжения к выходной частоте должно быть постоянным. Данное равновесие как раз и поддерживается частотным преобразователем.

2. Векторное управление удерживает момент нагрузки в постоянном виде во всем диапазоне частотных регулировок. Повышается точность управления, электропривод более гибко реагирует на изменяющуюся выходную нагрузку. В результате, момент вращения двигателя находится под непосредственным управлением преобразователя. Нужно учитывать, что момент вращения образуется в зависимости от тока статора, а точнее – от создаваемого им магнитного поля. Под векторным управлением фаза статорного тока изменяется. Эта фаза и есть вектор тока осуществляющий непосредственное управление моментом вращения.

2) Система ТП-Д представлена на рис. 1.7.

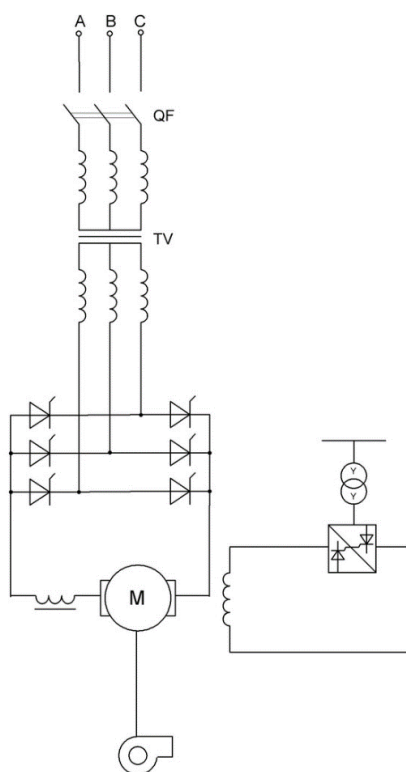


Рис. 1.7. Схема системы ТП-Д

Система ТП - Д - электропривод, в котором двигатель постоянного тока получает питание от тиристорного преобразователя переменного тока в постоянный. Позволяет регулировать угловую скорость двигателя, вращающий момент и другие параметры. Применяется в основном совместно с системой автоматического регулирования. Обладает хорошими регулировочными характеристиками, высокими надёжностью и кпд (обусловлено кпд тиристорного преобразователя - до 99%). Мощность от нескольких кВт до нескольких МВт [3].

Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время для управления ДПТ, является тиристорный преобразователь, то есть статический полупроводниковый преобразователь. Эти преобразователи представляют управляемые реверсивные или нереверсивные, однофазные или трёхфазные выпрямители, собранные по мостовой или нулевой схеме. Определённые перспективы развития тиристорных преобразователей связаны с использованием в них транзисторов, которые в настоящее время применяются в основном для импульсного регулирования напряжения.

3) Система АВК продемонстрирована на рис. 1.8.

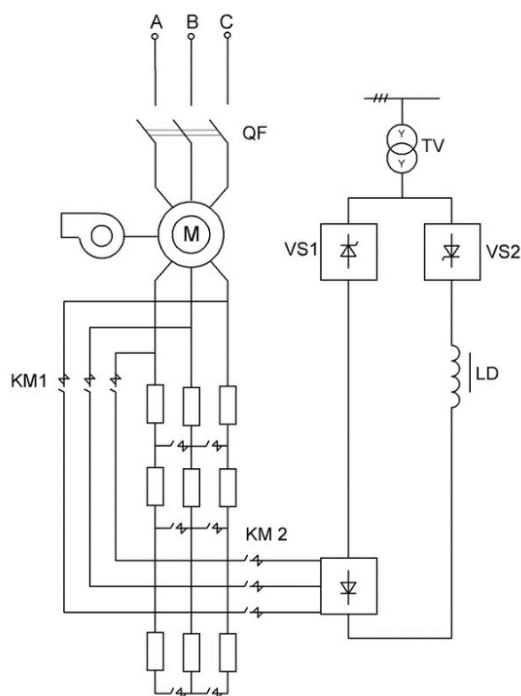


Рис. 1.8. Схема системы АВК

Принцип работы такой системы следующий – напряжения ротора выпрямляется и поступает в цепь постоянного тока, где с помощью инвертора регулируется величина тока цепи постоянного тока. Изменяя угол регулирования инвертора – изменяется ток вторичной цепи, соответственно скорость вращения ротора машины, при этом энергия ротора отдается обратно в сеть, что снижает потери электрической энергии при таком регулировании до 30% в сравнении с резистивной схемой включения. Главным недостатком асинхронно – вентильного каскада является невозможность реализации торможения машины, что требует установки дополнительного оборудования (устройств динамического торможения). Системы такого электропривода используют не только при модернизации, но и закладываются в новые проекты, поскольку если сравнить с регулированием по первичной цепи (статора) обычным частотным преобразователем, то электропривод АВК обладает следующими достоинствами:

- В отличие от частотного регулирования по статору, при необходимости наличия резервной системы управления, при использовании АВК в качестве резервной системы можно использовать резистивную схему управления, в то время как при частотном управлении по статору нужен только второй преобразователь частоты;
- Стоимость АВК значительно ниже, так как мощность роторной цепи ниже чем статорной.

Системы асинхронно – вентильного каскада применяют в механизмах, где нет необходимости в частых торможениях и разгонах (вентиляторы, конвейеры, мельницы).

Такая система позволяет плавно регулировать скорость вращения и момент машины, имеет большой диапазон регулирования скорости вращения электродвигателя (0 до  $\omega_n$ ), существенно снижает расход электроэнергии, но имеет и свои недостатки – генерация высших гармоник, что существенно искажает сеть, а также нагревает электродвигатель из –за искажения питающего напряжения. Для

решения этой проблемы довольно часто вместе с асинхронно – вентильным каскадом устанавливают фильтро–компенсирующие устройства ФКУ [6].

4) Система АД с фазным ротором отображена на рис. 1.9.

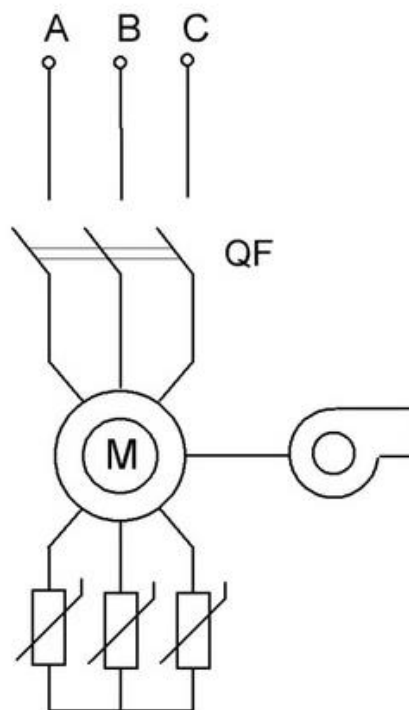


Рис. 1.9. Схема системы АД с фазным ротором

Принцип функционирования электродвигателя с фазным ротором основан на магнитном поле, которое вращается с угловой скоростью, зависящей от частоты сети и пар полюсов обмотки статора. Поле образовывается при соединении с сетью трехфазной обмотки. Как правило, асинхронный мотор имеет обмотку во много фаз (обычно три фазы), но существуют и однофазные. При пересечении обмоток магнитное поле в соответствии с правилом электромагнитной индукции индуцирует электродвижущую силу в этих обмотках. Если обмотка ротора замкнута, ее электродвижущая сила вводит в электроцепи ротора энергию. Образуется электромагнитный момент.

Двигатель назвали асинхронным из-за того, что угловая скорость ротора не равна угловой скорости вращения электромагнитного поля, то есть они двигаются несинхронно [11].

Процессы, проходящие в асинхронном электродвигателе, измеряют параметром под названием скольжение, который рассчитывается как разность угловых скоростей ротора и магнитного поля. Скольжение бывает положительным и отрицательным в зависимости от режима функционирования электромотора.

При идеальном холостом ходе оно равняется нулю, ротор и поле крутятся с равной быстротой. Никакой электродвижущей силы не образуется, ток и электромагнитный момент нулевые. При включении двигателя скольжение равняется 1 и при идеальном ходе постепенно достигает 0. Если вращать ротор в другую сторону относительно магнитного поля (разница угловых скоростей будет больше 1), появится тормозной момент, так как электродвигатель переходит в режим противовключения.

5) Система нерегулируемый привод показана на рис. 1.10.

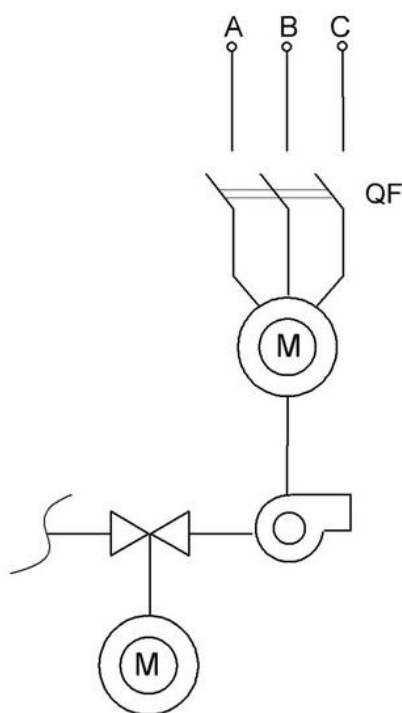


Рис. 1.10. Схема системы нерегулируемого привода

Под нерегулируемым будем понимать электропривод, работающий с постоянной (или изменяющейся в незначительных пределах) скоростью вращения.

К нерегулируемым приводам относятся электроприводы с многоскоростными асинхронными двигателями и с асинхронными фазными двигателями с релейно-контакторным управлением [9].

Наиболее распространенными типами нерегулируемых электроприводов являются электроприводы с короткозамкнутыми асинхронными двигателями, с асинхронными двигателями с фазным ротором, а также электроприводы на базе синхронных двигателей.

Для нерегулируемых электроприводов характерно непосредственное включение электродвигателя в питающую сеть без промежуточных преобразователей электрической энергии (преобразователей частоты и регуляторов напряжения). Управление нерегулируемым приводом осуществляется чаще всего с помощью контактной аппаратуры управления и защиты.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ

### 2.1. Расчет параметров схемы замещения

Паспортные и каталожные данные двигателя занесем в табл. 1.

Таблица 1

#### Данные двигателя

AIP56A2Y2		
Число фаз	$m$	3
Номинальная мощность, кВт	$P_{н\ дв}$	0,18
Номинальное скольжение	$s_{н}$	0,08
Критическое скольжение	$s_{к}$	0,46
Паспортный номинальный момент, Н·м	$M_{н\ п}$	0,41
Номинальная частота вращения об/мин	$n_{н\ дв}$	2700
Синхронная частота вращения об/мин	$n_1$	3000
Линейное напряжение, В	$U_{н\ дв}$	380
Фазное напряжение, В	$U_{1ф}$	220
Номинальный ток, А	$I_{н\ дв}$	0,54
Частота сети, Гц	$f_1$	50
Номинальный КПД, о. е.	$\eta_{н}$	0,657
Коэффициент мощности, о. е.	$\cos\varphi_{н}$	0,77
Кратность пускового тока	$i=I_{п}/I_{н}$	5,3
Кратность критического момента	$m_{к}=M_{к}/M_{н}$	2,2
Кратность пускового момента	$k_{т}=M_{п}/M_{н}$	2,2

<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>		
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сидирцева Н.Б.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>		
<i>Моделирование процессов в системе регулирования влажности</i>				
		<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		25	13	
<i>БГТУ им. В.Г. Шухова ЭА-43</i>				

Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	J	0,00042
Параметры двигателя в относительных единицах		
Индуктивное сопротивление холостого хода	x <sub>μ</sub>	2
Активное сопротивление обмотки статора	R' <sub>1</sub>	0,17
Индуктивное сопротивление обмотки статора	x' <sub>1</sub>	0,052
Активное сопротивление обмотки ротора	R <sub>2</sub> "	0,094
Индуктивное сопротивление обмотки ротора	x <sub>2</sub> "	0,067

Мощность вентилятора в нашем случае равна мощности двигателя:

$$N_{\text{ор нас}} = P_{\text{н дв}} = 0,18 \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{\text{н дв}} = \frac{P_{\text{н дв}}}{3U_{1f} \cos \varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}}} = \frac{180}{3 \cdot 220 \cdot 0,77 \cdot 0,657} = 0,54 \text{ А}. \quad (2.2)$$

Что соответствует значению указанному в технической документации двигателя.

Определим номинальную скорость вращения:

$$\omega_{\text{н дв}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н дв}}}{30} = \frac{\pi \cdot 2700}{30} = 282,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.3)$$

Номинальный момент статической нагрузки:

$$M_{\text{с.н}} = \frac{N_{\text{ор}}}{\omega_{\text{н дв}}} = \frac{180}{282,6} = 0,637 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.4)$$

Определим коэффициент пропорциональности:

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{с.н}}}{\omega_{\text{н дв}}^2} = \frac{0,637}{282,6^2} = 0,000008. \quad (2.5)$$

Произведём расчёт параметров схемы замещения:

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$$Z_6 = \frac{U_{1f}}{I_{1H}} = \frac{220}{0,54} = 407,407 \text{ Ом}; \quad (2.6)$$

$$R_1 = R'_1 \cdot Z_6 = 0,17 \cdot 407,407 = 69,259 \text{ Ом}; \quad (2.7)$$

$$x_1 = x'_1 \cdot Z_6 = 0,052 \cdot 407,407 = 21,185 \text{ Ом}; \quad (2.8)$$

$$R'_2 = R''_2 \cdot Z_6 = 0,094 \cdot 407,407 = 38,296 \text{ Ом}; \quad (2.9)$$

$$x'_2 = x''_2 \cdot Z_6 = 0,067 \cdot 407,407 = 27,296 \text{ Ом}. \quad (2.10)$$

Определим синхронную скорость вращения:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}. \quad (2.11)$$

Номинальный и критический моменты для паспортных данных:

$$M_H = \frac{P_{H \text{ ДВ}}}{\omega_{H \text{ ДВ}}} = \frac{180}{282,6} = 0,637 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.12)$$

$$M_{\text{кр паспорт}} = M_H \cdot m_K = 0,637 \cdot 2,2 = 1,401 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.13)$$

Определим потери в двигателе:

$$\Delta P_{H \text{ ДВ}} = \frac{P_{H \text{ ДВ}}(1 - \eta_H)}{\eta_H} = \frac{180(1 - 0,657)}{0,657} = 93,973 \text{ Вт}; \quad (2.14)$$

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,05 \cdot \Delta P_{H \text{ ДВ}} = 0,05 \cdot 93,973 = 4,699 \text{ Вт}; \quad (2.15)$$

$$\Delta P_{\text{доб 2}} = 0,03 \cdot \Delta P_{H \text{ ДВ}} = 0,03 \cdot 93,973 = 2,819 \text{ Вт}; \quad (2.16)$$

$$\Delta P_{\text{пер 2H}} = M_{\text{эм}} \cdot \omega_0 \cdot S_H = 0,661 \cdot 314 \cdot 0,08 = 16,6 \text{ Вт}, \quad (2.17)$$

где  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент, Н·м:

$$M_{\text{эм}} = M_H + M_0 = 0,637 + 0,024 = 0,661 \text{ Вт}, \quad (2.18)$$

где  $M_0$  – момент холостого хода, Н·м:

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$M_0 = \frac{\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб2}}}{\omega_0} = \frac{4,699 + 2,819}{314} = 0,024 \text{ Вт.} \quad (2.19)$$

Номинальные переменные потери в двигателе:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \frac{\Delta P_{\text{н дв}}}{1 + k_{\text{зн}}^2} = \frac{93,973}{1 + 0,845^2} = 54,826 \text{ Вт,} \quad (2.20)$$

где  $k_{\text{зн}}$  – коэффициент загрузки по номинальному КПД,  $k_{\text{зн}} = 0,845$ .

Номинальные постоянные потери:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{н дв}} - \Delta P_{\text{пер2н}} = 93,973 - 16,6 = 77,373 \text{ Вт.} \quad (2.21)$$

Номинальные переменные потери в статоре:

$$\Delta P_{\text{пер 1н}} = \Delta P_{\text{пер}} - \Delta P_{\text{пер 2н}} = 54,826 - 16,6 = 38,226 \text{ Вт.} \quad (2.22)$$

Максимальный электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм max}} = m_k \cdot M_n + M_0 = 2,2 \cdot 0,637 + 0,024 = 1,425 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.23)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\text{пер 1н}}}{3I_{\text{1н дв}}^2} = \frac{38,226}{3 \cdot 0,54^2} = 43,7 \text{ Ом.} \quad (2.24)$$

Полное расчётное сопротивление:

$$z = \frac{3U_{1f}^2}{2\omega_0 M_{\text{эм max}}} - R_1 = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 1,425} - 43,7 = 118,55 \text{ Ом.} \quad (2.25)$$

Индуктивное сопротивление КЗ:

$$x_k = \sqrt{z^2 - R_1^2} = \sqrt{118,55^2 - 43,7^2} = 110,2 \text{ Ом.} \quad (2.26)$$

Индуктивные сопротивления статора и ротора:

$$x_1 \approx x'_2 = 0,5x_k = 0,5 \cdot 110,2 = 55,1 \text{ Ом.} \quad (2.27)$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = I_{1H} \sqrt{1 - \cos \varphi_H} = 0,54 \cdot \sqrt{1 - 0,77} = 0,26 \text{ А.} \quad (2.28)$$

Потери в стали:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ст} &= \Delta P_{пост} - (\Delta P_{H \text{ мех}} + \Delta P_{доб 2}) = 77,373 - (4,699 + 2,819) \\ &= 69,855 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Эквивалентное сопротивление потерь в стали:

$$R_\mu = R_m = \frac{\Delta P_{ст}}{3I_0^2} = \frac{69,855}{3 \cdot 0,26^2} = 344,453 \text{ Ом.} \quad (2.30)$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \left( \frac{(R_1 + R_\mu)I_0}{U_{fH}} \right)^2} = \sqrt{1 - \left( \frac{(43,7 + 344,453) \cdot 0,26}{220} \right)^2} = 0,889. \quad (2.31)$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции:

$$x_\mu = x_m = \frac{U_{fH}}{I_0} \sin \varphi_0 - x_1 = \frac{220}{0,26} \cdot 0,889 - 55,1 = 697,13 \text{ Ом.} \quad (2.32)$$

Индуктивность статорной обмотки:

$$L_s = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{697,13}{314} = 2,22 \text{ Гн;} \quad (2.32)$$

## 2.2. Построение функциональной и структурной схем системы регулирования влажности для частотного электропривода вентилятора

Построим функциональную схему системы регулирования влажности для частотного электропривода вентилятора (рис. 2.1).

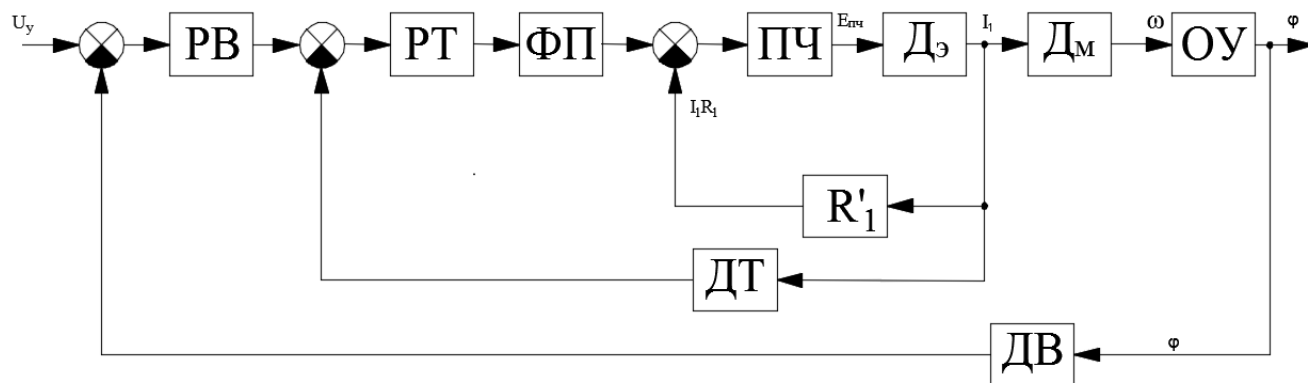


Рис. 2.1. Функциональная схема частотного электропривода вентилятора

В состав схемы входят следующие элементы [2]:

$U_y$  – напряжение задатчика;

РВ – регулятор влажности;

ФП – функциональный преобразователь;

РТ – регулятор тока;

ПЧ – преобразователь частоты;

$D_э$  – электрическая часть электропривода;

$D_м$  – механическая часть электропривода;

ДТ – датчик тока;

$R'_1$  – активное сопротивление току статора;

ДВ – датчик влажности;

ОУ – объект управления.

На базе функциональной схемы строим структурную схему (рис. 2.2),

где:  $k_{прв}$  – коэффициент числителя альтернативного регулятора влажности;

$k_{урв}$  – коэффициент знаменателя альтернативного регулятора влажности;

- $T_{\Sigma}$  – электромагнитная постоянная времени;
- $T_{пч}$  – постоянная времени преобразователя частоты;
- $k_{пч}$  – коэффициент передачи преобразователя частоты;
- $k_i$  – коэффициент передачи звена постоянного тока;
- $k_{от}$  – коэффициент обратной связи по току;
- $k_{дв}$  – пропорциональный коэффициент по влажности;
- $k_{ос}$  – коэффициент внутренней ОС;
- $k_M$  – коэффициент пропорциональности между моментом и током;
- $J_{\Sigma}$  – приведенный момент инерции;
- $a_T$  – параметр настройки контура на модульный оптимум;
- $W_{оу}$  – передаточный коэффициент объекта управления.

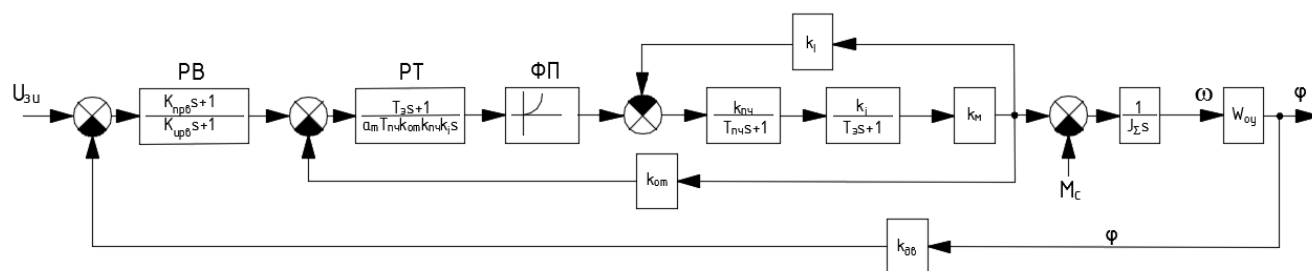


Рис. 2.2. Структурная схема частотного электропривода вентилятора

### 2.3. Моделирование динамических и статических процессов в системе регулирования влажности для частотного электропривода вентилятора

На основании структурной схемы построим математическую модель и рассчитаем необходимые параметры [5]:

1. Коэффициент обратной связи по току:

$$k_{от} = \frac{1}{k_T} = \frac{1}{0,0355} = 28,17, \quad (2.34)$$

где  $k_T$  – коэффициент передачи замкнутого контура регулирования тока:

$$k_T = \frac{I_{1\mu}}{U_{yH}} = \frac{0,355}{10} = 0,0355, \quad (2.35)$$

$U_{yH} = 10$  В – напряжение задания.

$$I_{1\mu} = I_{HДВ} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = 0,54 \cdot \sqrt{1 - 0,77^2} = 0,355 \text{ А.} \quad (2.36)$$

2. Коэффициент передачи внутренней обратной связи по скорости:

$$k_\omega = \frac{I_{1\mu}(x_\mu + x_1)}{\omega_{HДВ}} = \frac{0,355 \cdot (697,13 + 55,1)}{282,6} = 0,945. \quad (2.37)$$

3. Коэффициент передачи звена постоянного тока:

$$k_I = \frac{I_{HДВ}}{k_\omega(\omega_0 - \omega_{HДВ})} = \frac{0,54}{0,945 \cdot (314 - 282,6)} = 0,018. \quad (2.38)$$

4. Коэффициент преобразователя частоты:

$$k_{ПЧ} = \frac{U_{HДВ}}{U_{yH}} = \frac{380}{10} = 38. \quad (2.39)$$

5. Передаточный коэффициент третьего безынерционного звена:

$$k_M = \frac{M_{с.н}}{I_{HДВ}} = \frac{0,637}{0,54} = 1,18. \quad (2.40)$$

6. Коэффициент обратной связи по влажности:

$$k_B = \frac{M_{с.н}}{\omega_{HДВ}^2} = \frac{0,637}{282,6^2} = 0,00000798. \quad (2.41)$$

7. Электромагнитная постоянная времени:

$$T_\varepsilon = \frac{L_S}{R_1} = \frac{2,22}{43,7} = 0,051. \quad (2.42)$$

8. Суммарный момент инерции двигателя и вентилятора:

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{в}} = 0,00042 + 0,00042 = 0,00084 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.43)$$

где:  $J_{\text{в}} = 0,00042 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  для нашего случая.

9. Постоянная времени преобразователя частоты:

$$T_{\text{пч}} = 0,01 \text{ с}. \quad (2.44)$$

10. Коэффициенты модульного оптимума:

$$a_{\text{т}} = 2, \quad (2.45)$$

$$a_{\text{с}} = 2, \quad (2.46)$$

$$b_{\text{с}} = 2. \quad (2.47)$$

11. Настройки для модульного оптимума:

$$W_{\text{ртіс}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{пч}} \cdot k_{\text{от}} \cdot k_{\text{пч}} \cdot k_{\text{і}} = 2 \cdot 0,01 \cdot 28,17 \cdot 38 \cdot 0,018 = 0,385. \quad (2.48)$$

12. Пропорциональный коэффициент по влажности:

$$k_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ун}}}{100} = \frac{10}{100} = 0,1. \quad (2.49)$$

13. Коэффициент знаменателя:

$$k_{\text{ізв}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{пч}} \cdot k_{\text{от}} \cdot k_{\text{пч}} \cdot k_{\text{і}} \cdot k_{\text{дв}} = 2 \cdot 0,01 \cdot 28,17 \cdot 38 \cdot 0,018 \cdot 0,1 = 0,0385. \quad (2.50)$$

14. Расчет числителя альтернативного регулятора влажности:

$$k_{\text{прв}} = b_{\text{с}} \cdot a_{\text{т}} \cdot a_{\text{с}} \cdot T_{\text{пч}} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,01 = 0,08. \quad (2.51)$$

15. Расчет знаменателя альтернативного регулятора влажности:

$$k_{\text{ирв}} = \frac{k_{\text{дв}} \cdot b_{\text{с}} \cdot a_{\text{с}}^2 \cdot a_{\text{т}}^2 \cdot T_{\text{пч}}^2}{J_{\Sigma} \cdot k_{\text{от}}} = \frac{0,1 \cdot 2 \cdot 2^2 \cdot 2^2 \cdot 0,01^2}{0,00084 \cdot 28,17} = 0,0135. \quad (2.52)$$

Принимаем время разгона  $t_{\text{пуск}} = 9,5 \text{ с}$ , так как это значение было получено опытным путем при замере скорости выхода электропривода на номинальную частоту вращения.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В программе Matlab Simulink составим математическую модель (рис. 2.3), произведем моделирование и снимем характеристики переходных процессов для уровня влажности 60% и для максимальной влажности равной 80% [8]:

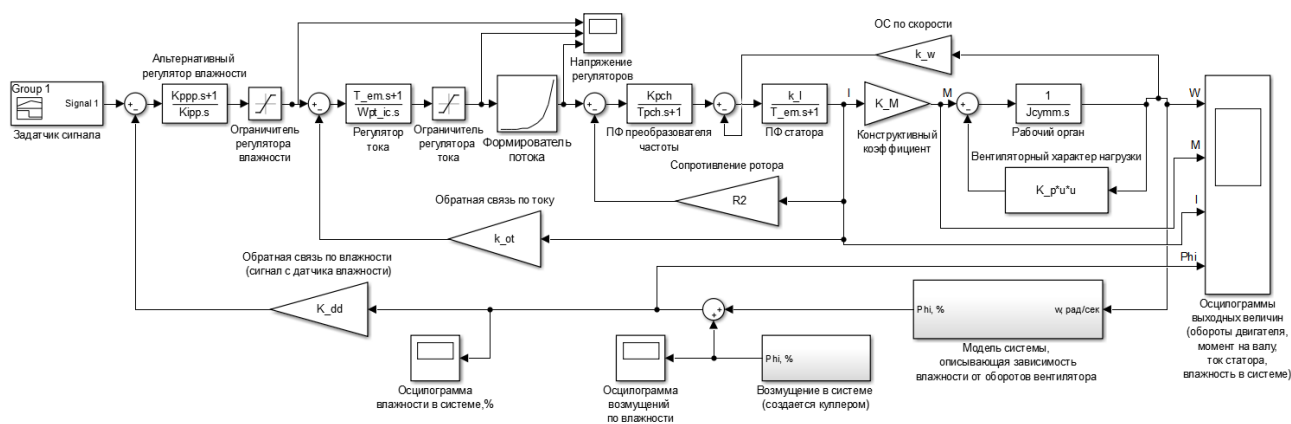


Рис. 2.3. Имитационная модель управления системой регулирования влажности

Сигнал задания для первого опыта показан на (рис. 2.4), при  $U_{зи} = 6$  В уровень влажности должен составить 60 %.

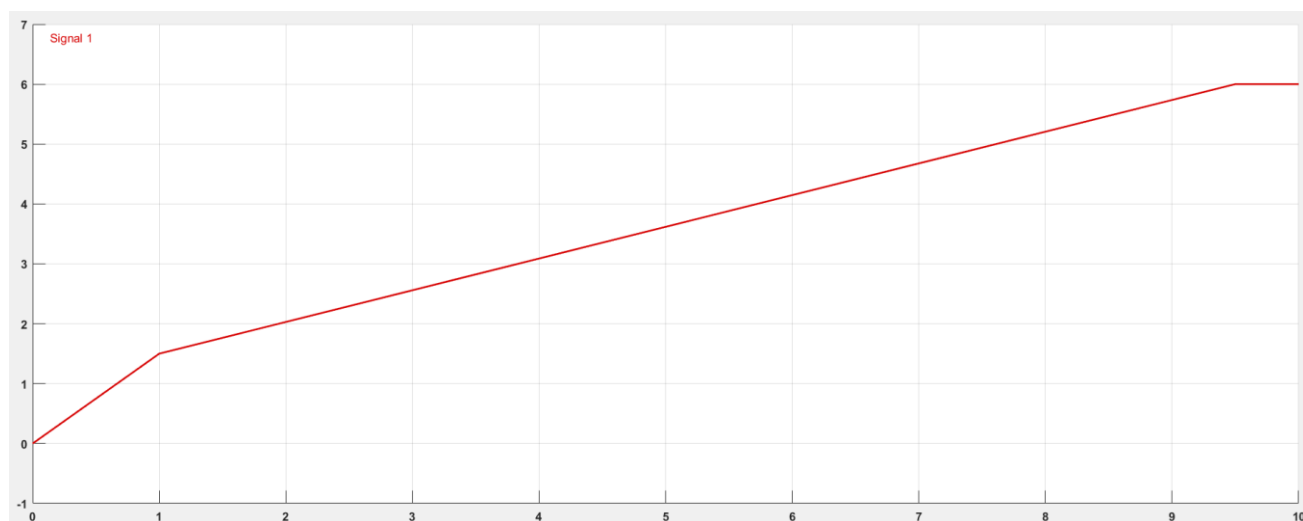


Рис. 2.4. Подача сигнала задания при  $t_{пуск} = 9,5$  с,  $U_{зи} = 6$  В

Как следует из рис. 2.5 для первого опыта, за заданное время двигатель регулирует уровень влажности и в том числе выходит на номинальную скорость вращения, которая составляет 282,6 рад/с, при этом момент 0,64 Н · м и ток 0,54 А, а уровень влажности составляет 60%. При увеличении уровня влажности скорость вращения двигателя уменьшается, при уменьшении уровня влажности - скорость вращения двигателя увеличивается.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

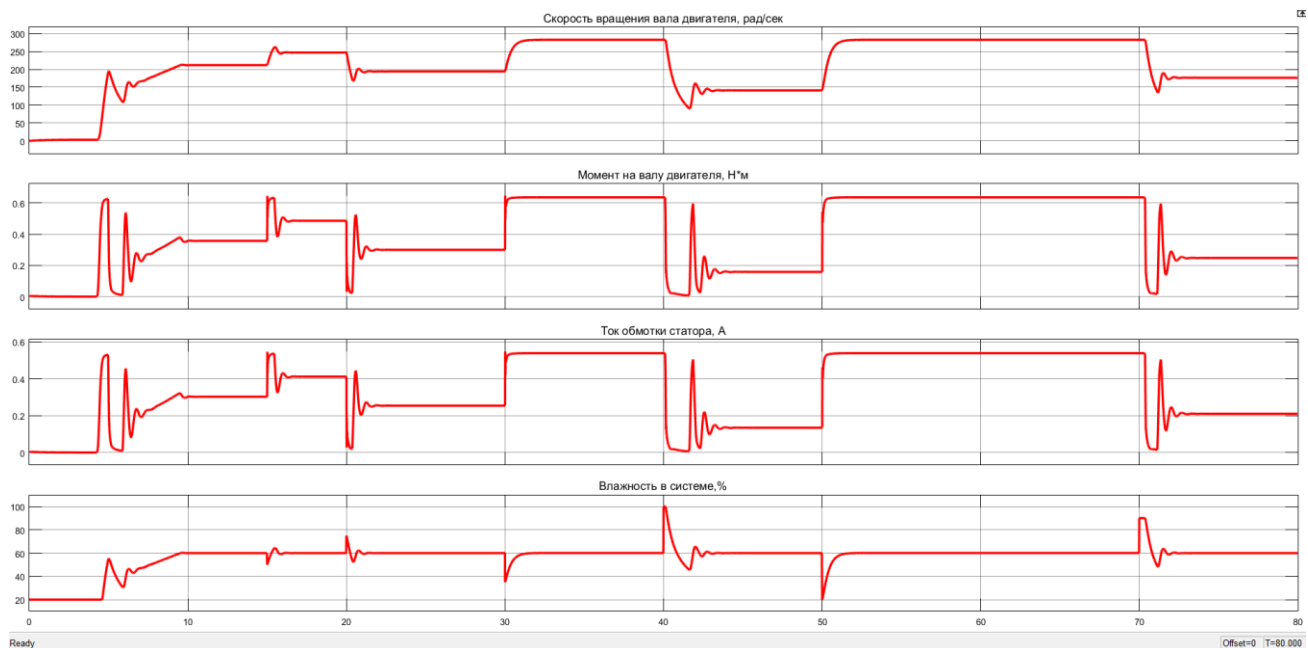


Рис. 2.5. Переходные процессы системы регулирования влажности при  $U_{зи} = 6 В$

На рис. 2.6 продемонстрирована характеристика возмущений для первого опыта, имитирующих сквозные потоки воздуха, создаваемые кулером.

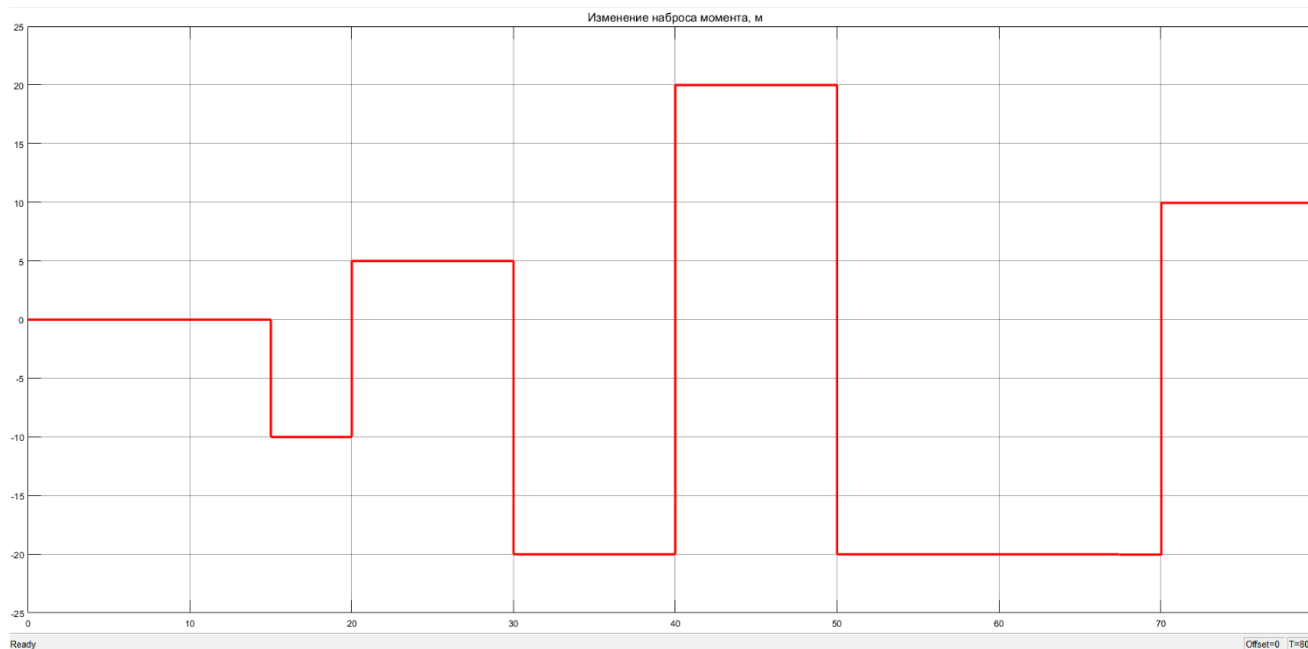


Рис. 2.6. Характеристика возмущений по влажности при  $U_{зи} = 6 В$

На рис. 2.7 продемонстрирована характеристика уровня влажности в системе за цикл работы первого опыта.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

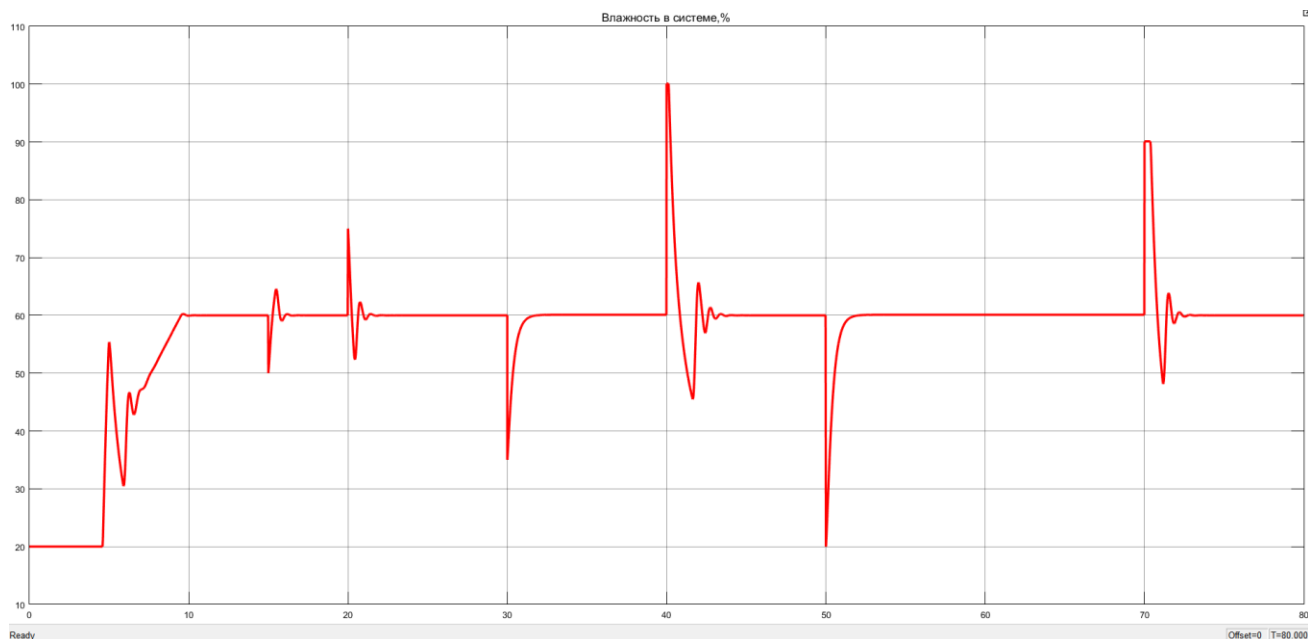


Рис. 2.7. Характеристика влажности в системе при  $U_{зи} = 6 \text{ В}$

Сигнал задания для второго опыта продемонстрирован на (рис. 2.8), при  $U_{зи} = 8 \text{ В}$  уровень влажности должен составить 80 %.

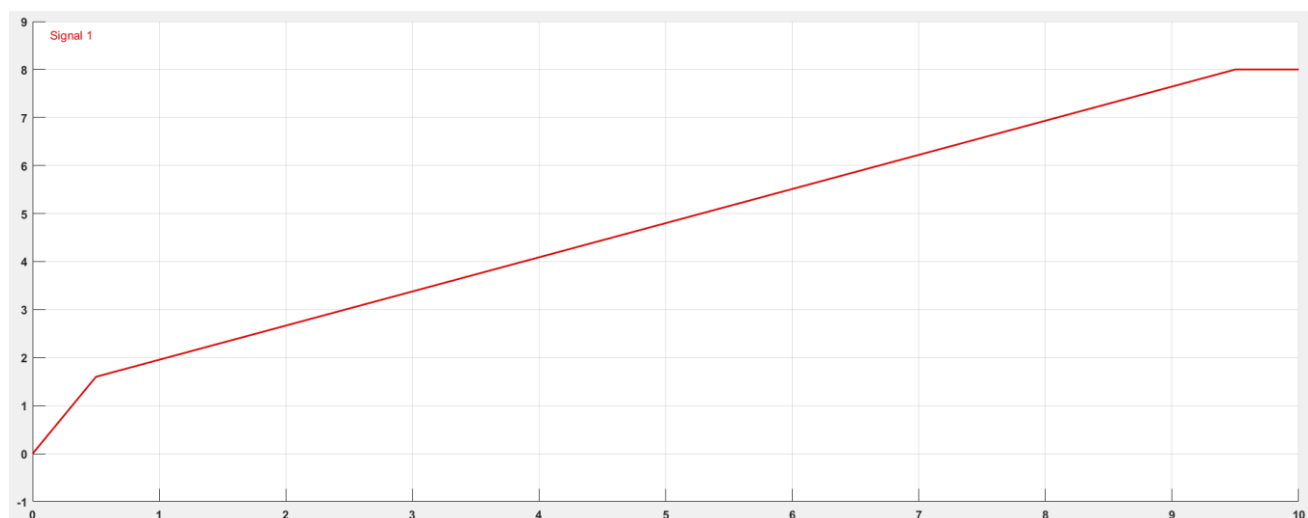


Рис. 2.8. Подача сигнала задания при  $t_{\text{пуск}} = 9,5 \text{ с}$ ,  $U_{зи} = 8 \text{ В}$

Как следует из рис. 2.9 для второго опыта, двигатель регулирует уровень влажности при тех же параметрах системы, что и в первом опыте, а уровень влажности составляет 80%. Зависимость скорости вращения двигателя от уровня влажности аналогична первому опыту.

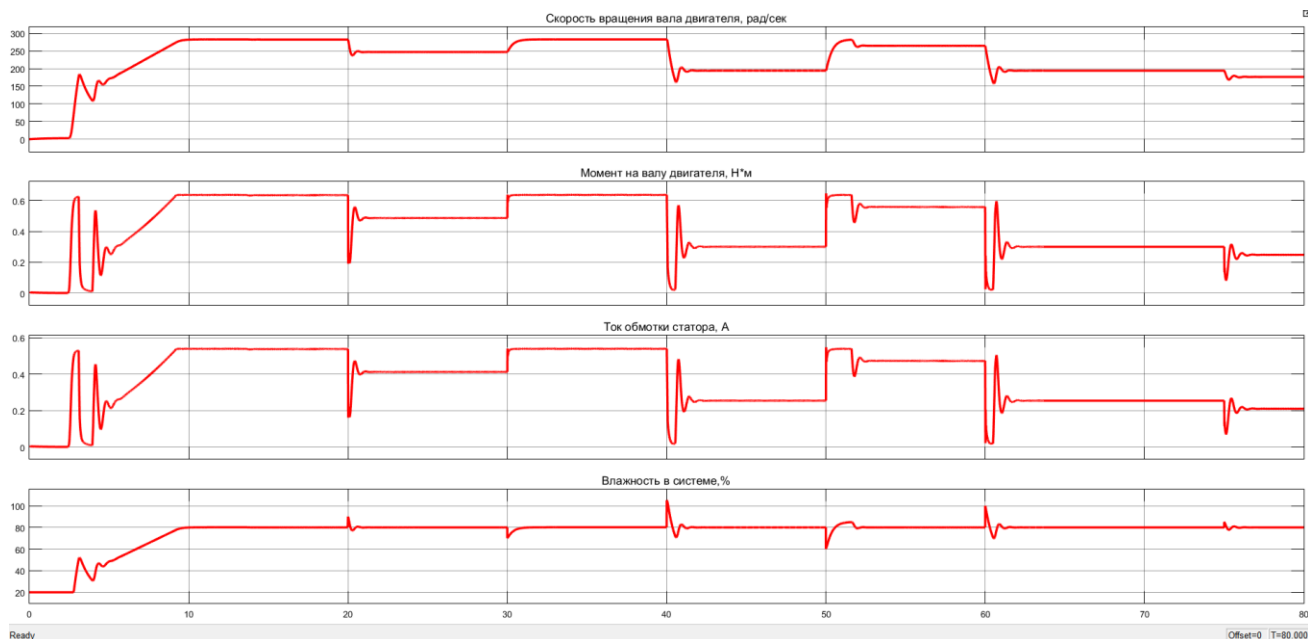


Рис. 2.9. Переходные процессы системы регулирования влажности при  $U_{зи} = 8 В$

На рис. 2.10 продемонстрирована характеристика возмущений для второго опыта, имитирующих сквозные потоки воздуха, создаваемые кулером.

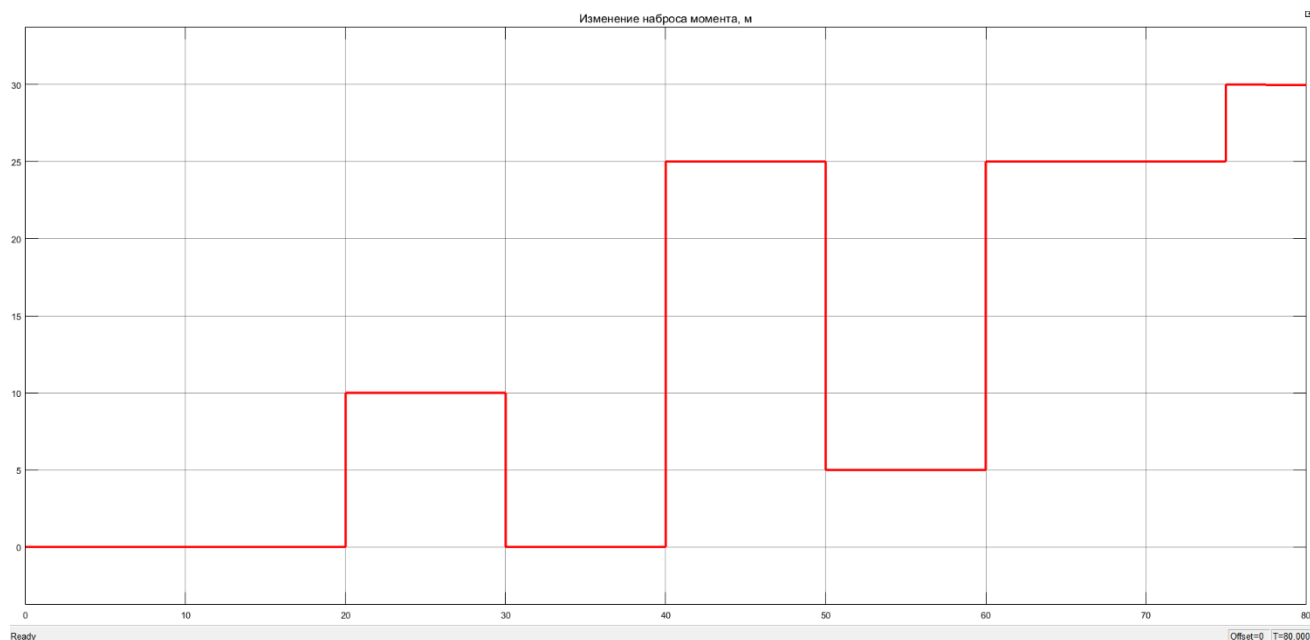


Рис. 2.10. Характеристика возмущений по влажности при  $U_{зи} = 8 В$

На рис. 2.11 продемонстрирована характеристика уровня влажности в системе за цикл работы второго опыта.

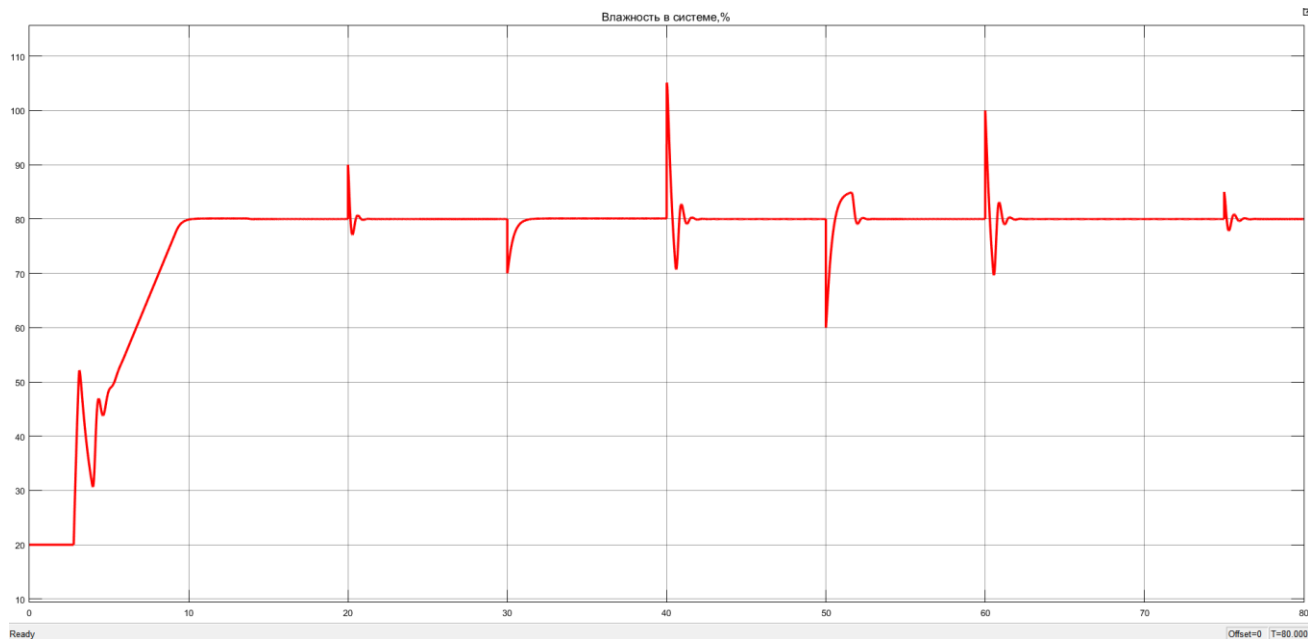


Рис. 2.11. Характеристика влажности в системе при  $U_{зи} = 8 \text{ В}$

Из проведенного моделирования динамических и статических процессов можно сделать вывод, что система работает правильно, осуществляет регулирование влажности в соответствии с заданием в 60 и 80 процентов, а также обрабатывает заданные возмущения по влажности.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

#### 3.1. Построение характеристик вентилятора

Полная характеристика вентилятора определяется зависимостью полного давления  $H$ , потребляемой мощности  $P$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  от подачи  $Q$  (рис. 3.1). Характеристики вентилятора находят в паспортных данных, предоставляемых производителем.

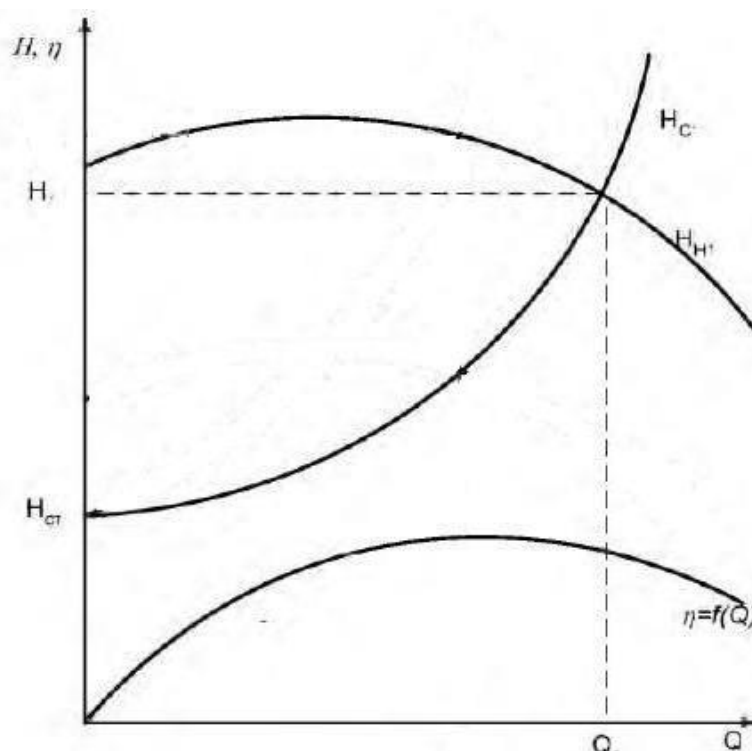


Рис. 3.1. Полная характеристика вентилятора

Поскольку тип и характеристики вентилятора, установленного на лабораторном стенде не известны, характеристики  $Q$ - $H$  вентилятора были найдены экспериментально. Аэродинамические испытания были проведены непосредственно на лабораторном стенде с его дополнительной доработкой. На рис. 3.2 показана структурная схема измерительного стенда. Сечения 1-1 и 2-2 – места измерения давления.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Пономарев И.Э.			Лит	Лист	Листов
Провер.		Лимаров А.И.				39	13
Н. Контр.		Сибирцева Н.Б.			БГТУ им. В.Г. Шухова ЭА-43		
Утверд.		Белоусов А.В.					
Исследование способов регулирования							

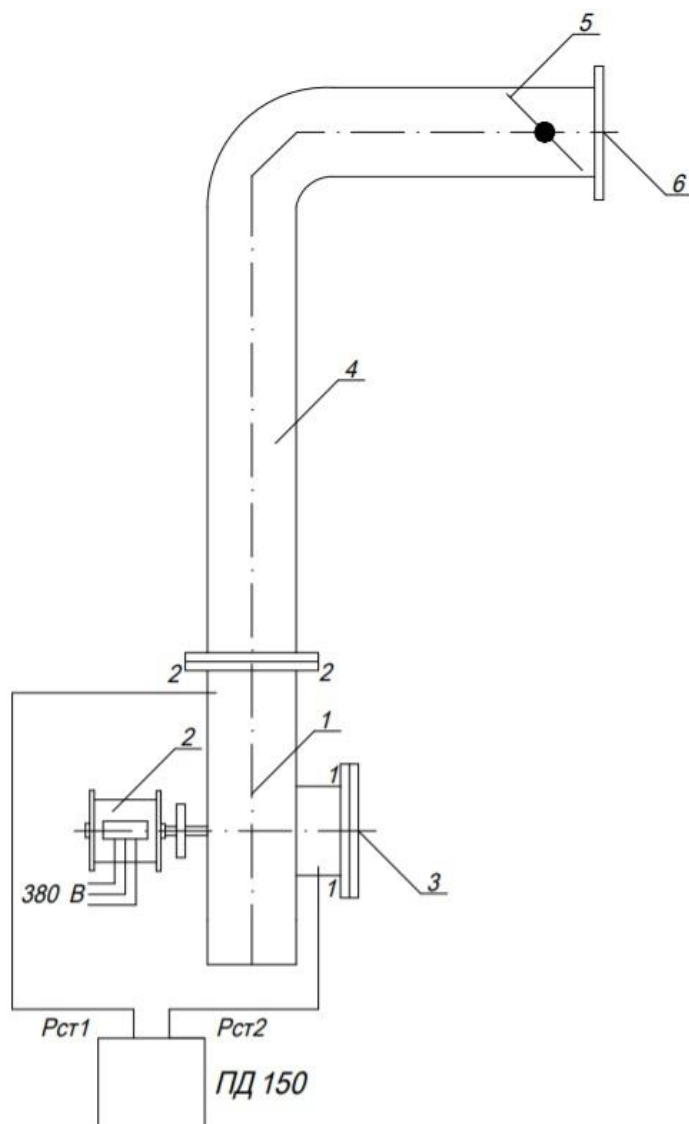


Рис. 3.2. Структурная схема измерительного стенда:

- 1 – вентилятор; 2 – асинхронный двигатель; 3 – всасывающий патрубок;  
4 – нагнетающий патрубок; 5 – дроссельная заслонка; 6 – выпускной патрубок

Снятие характеристики вентилятора осуществлялось при различных положениях дроссельной заслонки, с помощью которой изменялся режим работы. Так при  $Q = 0$  дроссельная заслонка была полностью закрыта. Измерение полного статического давления при различных значениях  $Q$  производилось в точках отбора пробы 1-1 и 2-2 на всасывающем и нагнетающем патрубке, показанных на рис 3.2. Для измерения статического давления использовался дифференциальный



манометр типа ПД 150 с максимальным диапазоном измерения 1 кПа. Структурная схема дифференциального манометра показана на рис. 3.3 [13].

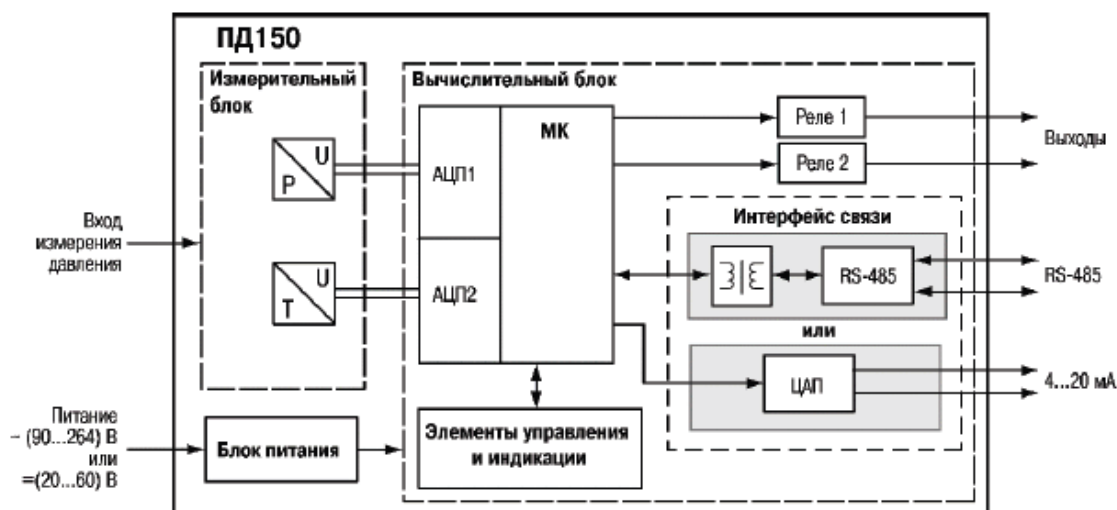


Рис.3.3. Структурная схема дифференциального манометра ПД 150

Технические характеристики ПД 150 приведены в таблице, которая изображена на рис. 3.4.

Наименование	Значение
<b>Канал измерения давления</b>	
Верхний предел измерения давления, кПа (зависит от исполнения, см. таблицу 3.1)	от 0,2 до 100
Класс точности (зависит от исполнения)	0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5
Период обновления результатов измерения, с, не более	0,2
<b>Интерфейс связи RS-485</b>	
Скорости обмена, бит/сек	2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600, 115200
Количество ошибок при нормальных условиях, %, не более	0,1
Протоколы связи	Modbus (RTU), Modbus (ASCII)
Входное сопротивление	12 кОм (стандартная нагрузка)
Гальваническая развязка	есть
Тип используемого кабеля	экранированная витая пара
Длина кабеля, м, не более	1200
<b>Аналоговый выход</b>	
Тип выходного сигнала	постоянный ток от 4 до 20 мА
Максимальное сопротивление нагрузки, Ом	650
Разрешающая способность, мкА, не более	10
Индикация аварийного состояния преобразователя	настраиваемая (отключена; 3,5 или 22 мА)

Рис. 3.4. Технические характеристики преобразователя дифференциального давления ПД 150

Измерительный стенд для снятия характеристик вентилятора показан на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Измерительный стенд для снятия характеристик вентилятора  
Полученные экспериментальные данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Экспериментальные данные**

Q <sub>ном</sub> , %	0	7,5	15	22,5	30	37,5
n=2700						
H <sub>вент.</sub>	99	96	86	69	48	25

Изменение частоты вращения вентилятора приводит к изменению его характеристик. Для получения характеристик при других скоростях применяют формулы, пользуясь законами пропорциональности (рис. 3.6):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2};$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2;$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3;$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2,$$

Рис. 3. 6. Формулы для расчета характеристик

Полученные расчетные данные сведены в табл. 3 и показаны виде графиков рис. 3.7.

Таблица 3

**Расчетные данные**

Q <sub>ном</sub> , %	0	7,5	15	22,5	30	37,5
n=2700						
H <sub>1вент.</sub>	99	96	86	69	48	25
n=2160						
H <sub>2вент.</sub>	63,36	61,44	55,04	44,16	30,72	16
n=1620						
H <sub>3вент.</sub>	35,64	34,56	30,96	24,84	17,28	9
n=1080						
H <sub>4вент.</sub>	15,84	15,36	13,76	11,04	7,68	4

Так же были проведены проверочные экспериментальные замеры в расчетных точках, которые подтвердили соответствие расчетным данным. Разница между расчетными и экспериментальными данными составляла не более 1-2 Па.

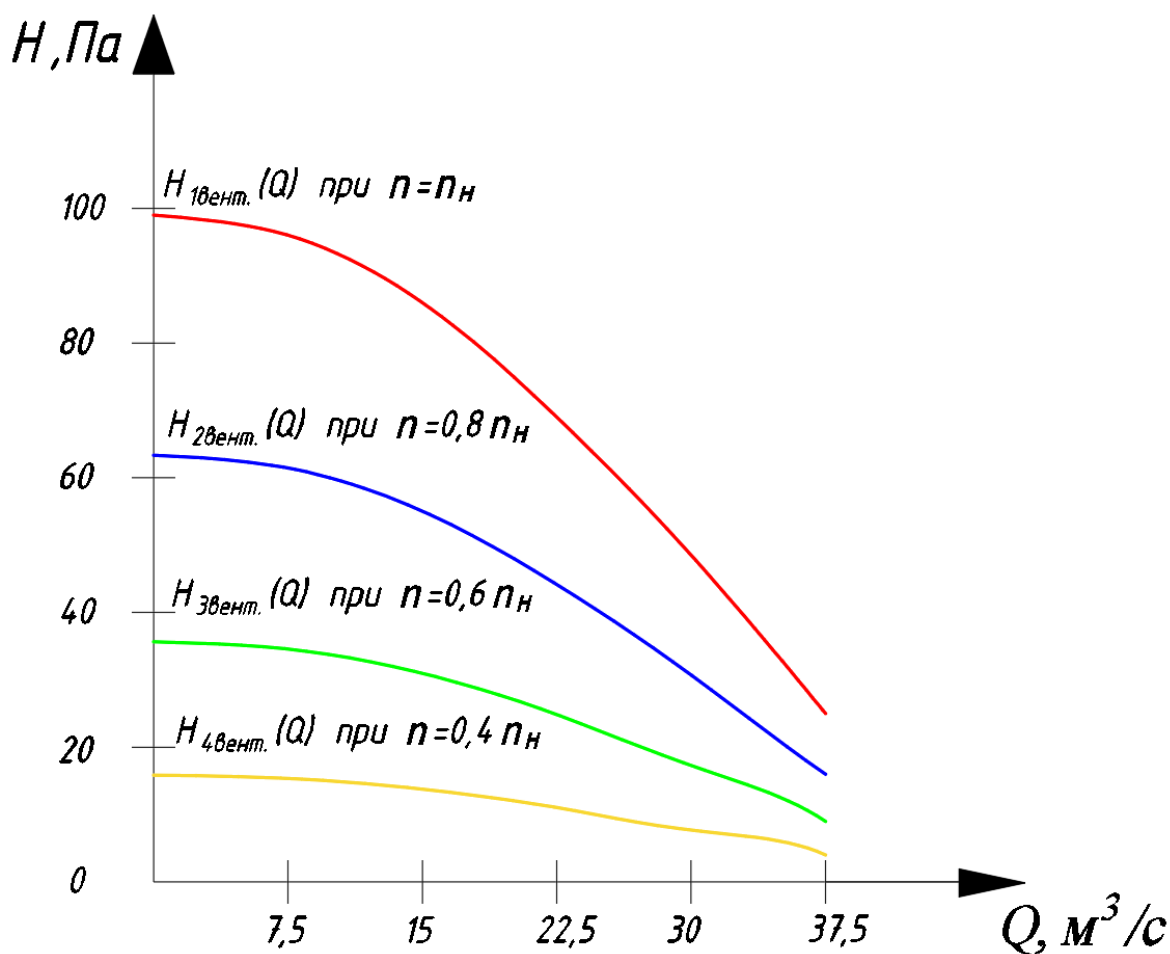


Рис. 3.7. Зависимости Q-H вентилятора при различной частоте вращения двигателя  
 Определение параметров магистрали определяется формулой:

$$H = kQ^2, \quad (3.1)$$

где: H – напор на магистрали, Па,

k – коэффициент пропорциональности,

Q – подача, м³/с.

Определение параметров в коллекторе проводилось на измерительном стенде, его структурная схема показана на рис. 3.8.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

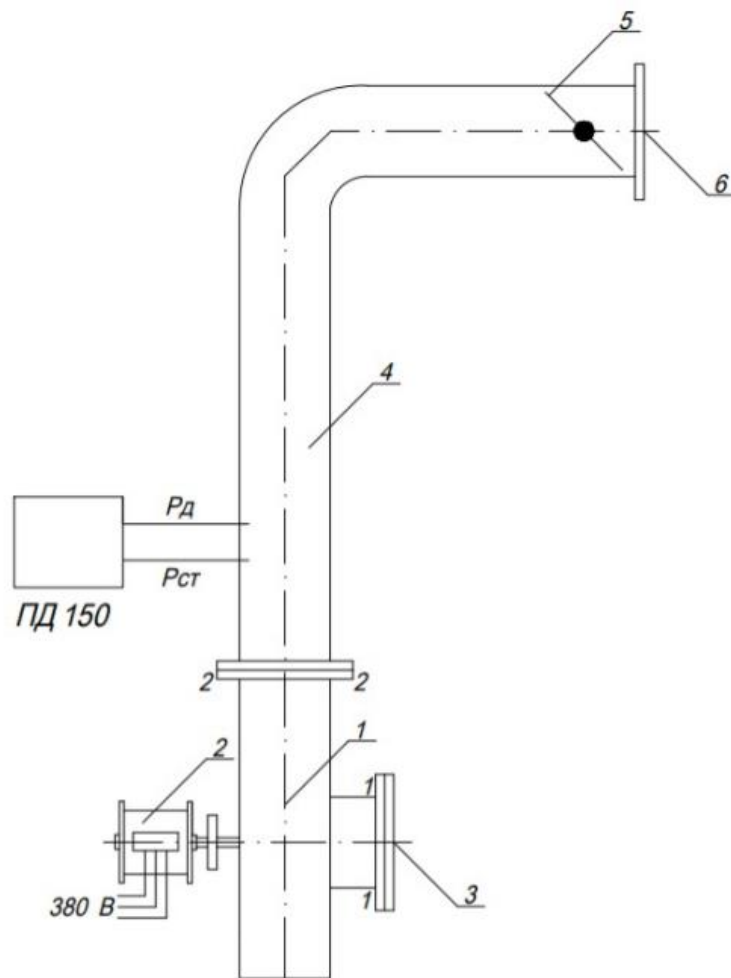


Рис. 3.8. Структурная схема измерительного стенда

1 – вентилятор; 2 – асинхронный двигатель; 3 – всасывающий патрубок;  
4 – нагнетающий патрубок; 5 – дроссельная заслонка; 6 – выпускной патрубок

Измерения производились в следующей последовательности. Изменяя положение дроссельной заслонки изменялась подача воздуха в коллекторе. С помощью дифференциального манометра ПД 150 проводилось измерение полного и статического давления. Значение динамического давления вычислялось по формуле:

$$P_d = P_p - P_{ст}, \quad (3.2)$$

где:  $P_p$  – полное давление в коллекторе, Па,

$P_d$  – динамическое давление в коллекторе, Па,

$P_{ст}$  – статическое давление в коллекторе, Па.

После определения динамического давления производился расчет подачи  $Q$ .

Подача вентилятора  $Q$  ( $м^3/с$ ) определяется по формуле:

$$Q = \alpha F v, \quad (3.3)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент коллектора, равный 0,985,

$F$  – площадь поперечного сечения коллектора в месте измерения, м,

$v$  – средняя скорость движения воздуха в коллекторе, м/с.

Средняя скорость движения воздуха в рассматриваемом коллекторе определяется по формуле:

$$v = \sqrt{2P_d / \rho}, \quad (3.4)$$

где:  $P_d$  – динамическое давление, Па,

$\rho$  – плотность воздуха при 20° С,  $\rho = 1,2$  кг/ м<sup>3</sup>.

Полученные данные занесены в табл. 4 и нанесены в виде графика на полную характеристику вентилятора, показанную на рис. 3.9.

Таблица 4

Данные для построения полной характеристики вентилятора

$H$ , Па	$Q$ , м <sup>3</sup> / с
5	$8 \cdot 10^{-3}$
16	$15 \cdot 10^{-3}$
36	$23 \cdot 10^{-3}$
63	$31 \cdot 10^{-3}$
100	$39 \cdot 10^{-3}$

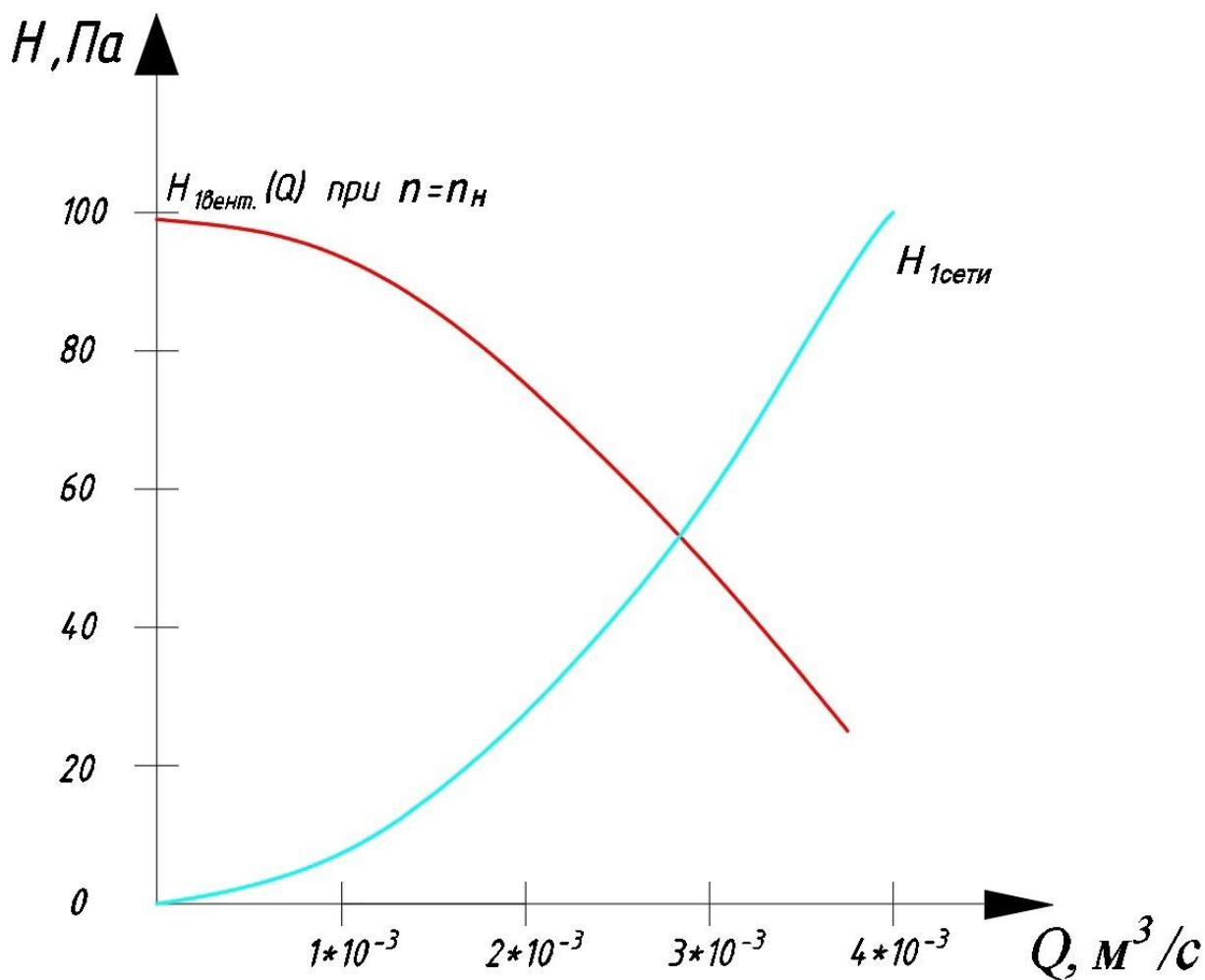


Рис. 3.9. Полная характеристика вентилятора

### 3.2. Исследование способов регулирования

В ходе работы были проведены сравнительные исследования по стабилизации влажности с регулятором, выход которого подключался к исполнительному механизму в виде дроссельной заслонки, а также с регулятором частоты асинхронного двигателя. И в первом и во втором случае сигналом обратной связи регуляторов был сигнал датчика влажности.

В ходе испытаний был применен экспериментальный метод настройки регуляторов, не требующий знания математической модели. Подбор коэффициентов регуляторов осуществлялся только в режиме пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора.

Графики переходных процессов с исполнительным механизмом – дроссельная заслонка, с различными параметрами ПИД – регулятора показана на рис. 3.10.

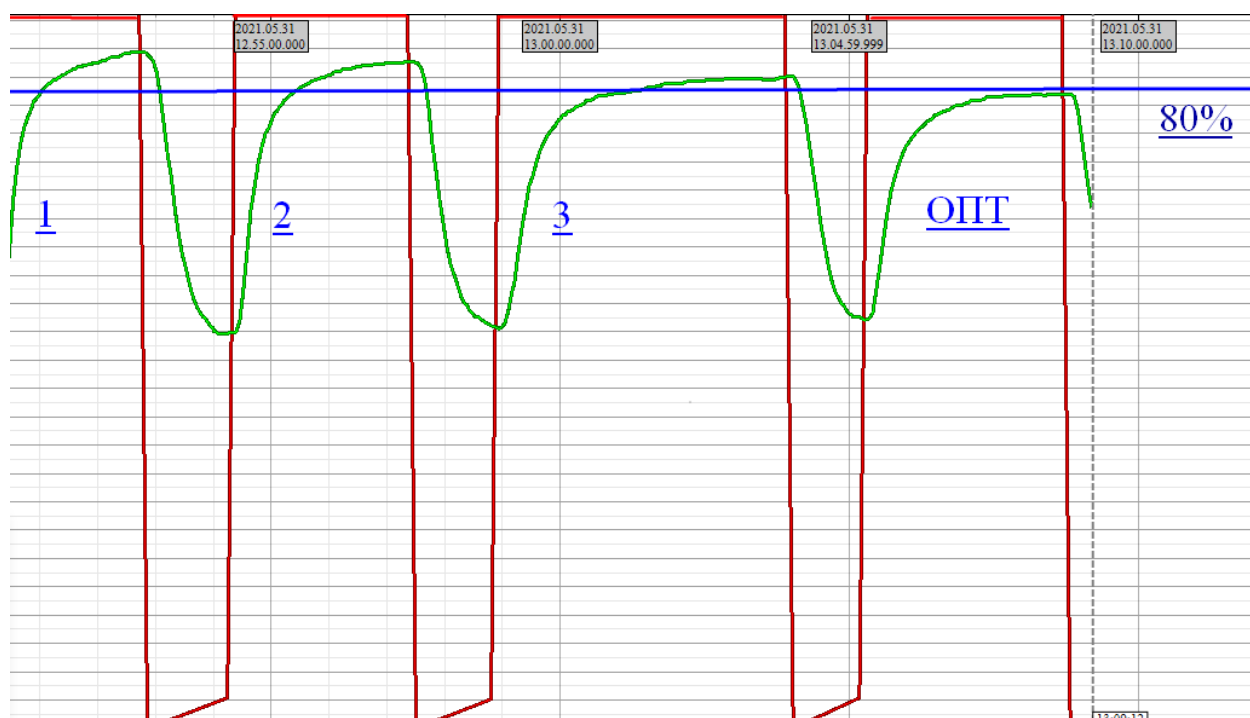


Рис. 3.10. График переходного процесса по заданию влажности 80%

График зеленого цвета – влажность

График красного цвета - частота асинхронного двигателя вентилятора (50 Гц)

Параметры ПИД – регулятора сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Параметры ПИД - регулятора**

Название параметра	1	2	3	опт
Полоса пропорциональности	500	470	450	420
Постоянная интегрирования	4	4	4	4

На рис. 3.11 показан график переходного процесса по заданию влажности 80% с исполнительным механизмом – преобразователь частоты.



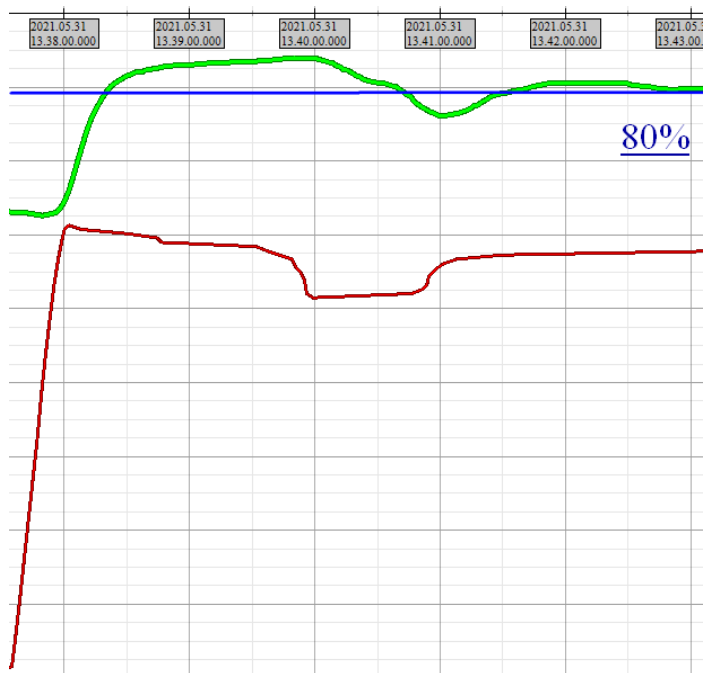


Рис. 3.11. График переходного процесса по заданию влажности

График зеленого цвета – влажность.

График красного цвета - частота асинхронного двигателя вентилятора.

На рис. 3.12 показан график переходного процесса по возмущению.

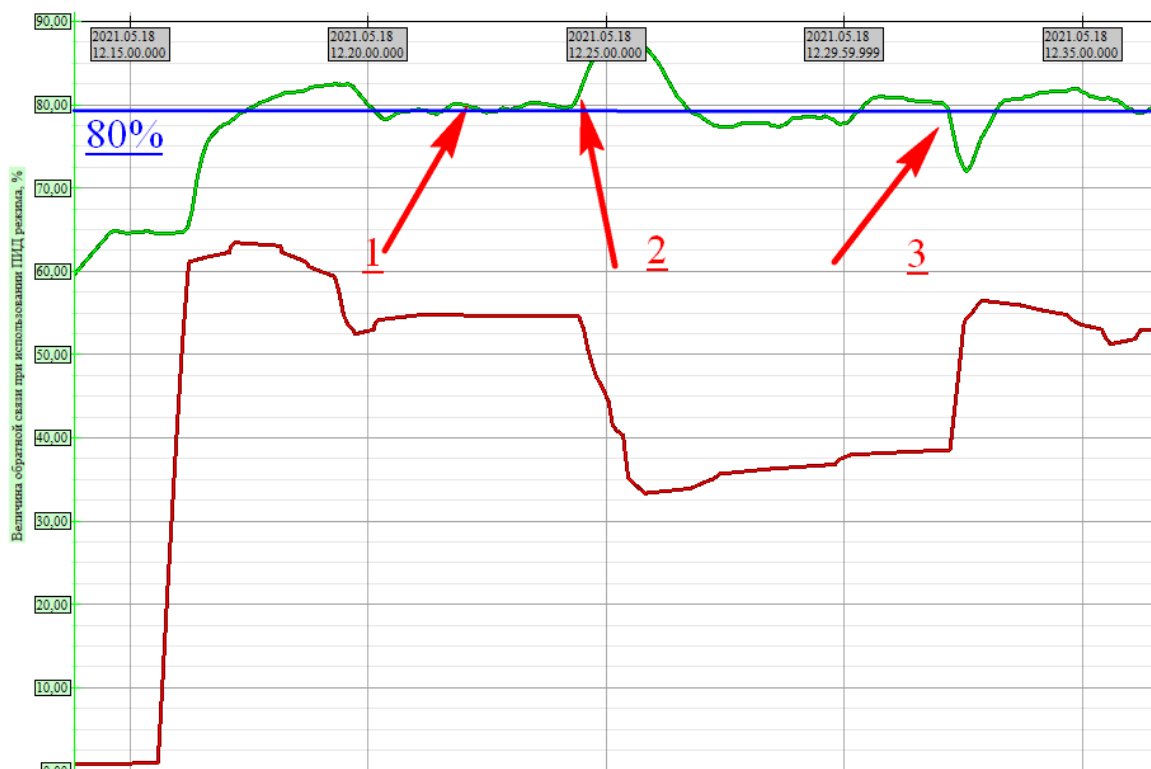


Рис. 3.12. График переходного процесса по возмущению влажности

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

График зеленого цвета – влажность.

График красного цвета - частота асинхронного двигателя вентилятора.

На рис. 3.12 обозначены:

т.1 – выход на задание 80%;

т.2 – точка начала возмущения по увеличению влажности;

т.3 – точка начала возмущения по уменьшению влажности.

В ходе проведения исследований по подбору параметров ПИД – регуляторов сделан вывод о том, что переходные процессы регулирования дроссельной заслонкой и регулятором преобразователя частоты не оказывают принципиального значения на качество регулирования. Увеличенное время регулирования при стабилизации влажности дроссельной заслонкой объясняется несовершенством конструкции генератора влажности и аэродинамическими свойствами потока воздуха вентилятора. А устранение незначительного перерегулирования при управлении преобразователем частоты требует подбора более точных значений параметров регулятора.

### 3.3. Сравнение энергетических характеристик регулирования

При изменении проходного сечения коллектора дроссельной заслонкой и уменьшения подачи в 2 раза изменяется характеристика магистрали, и рабочий режим вентилятора перемещается из точки 1 в точку 2 (рис. 3.13).

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

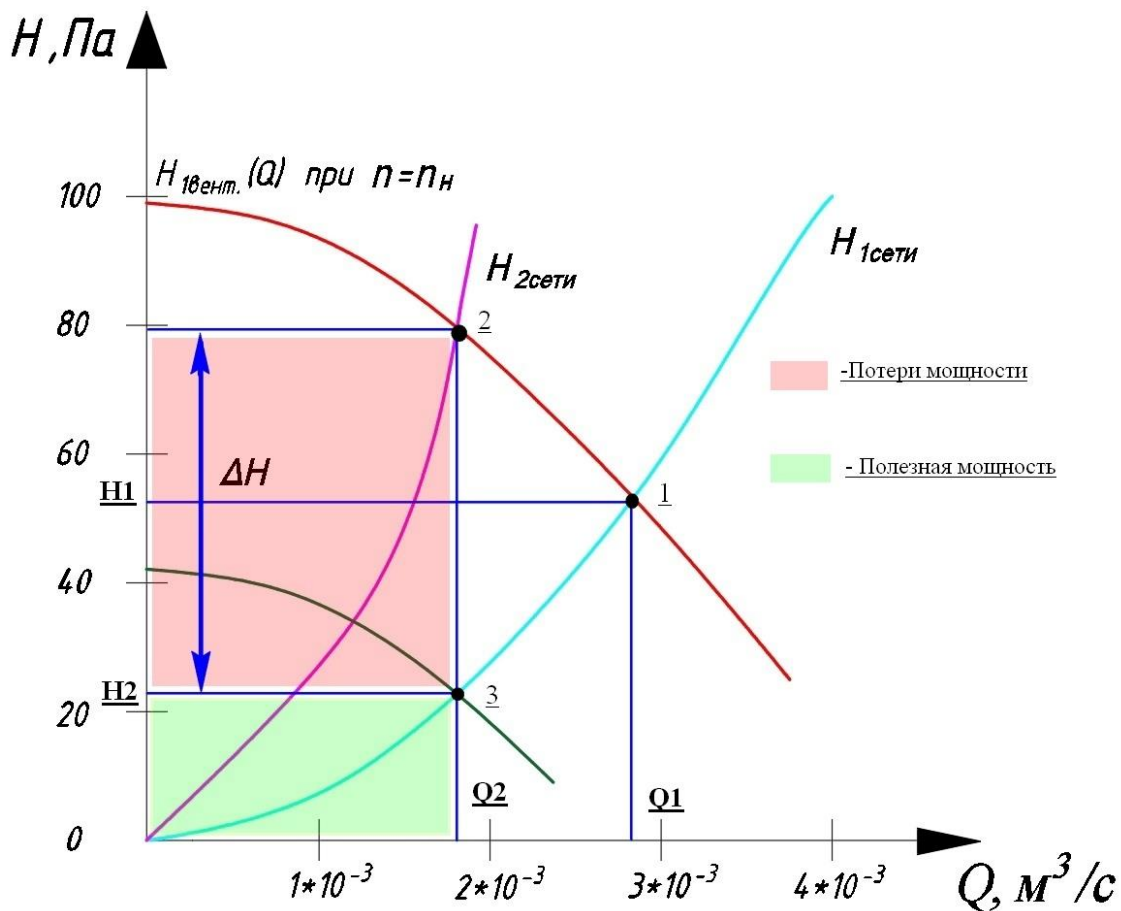


Рис. 3.13. Сравнительный анализ регулирования подачи вентилятора

При этом потери мощности на задвижке будут пропорциональны падению на ней напора:

$$\Delta P = cQ\Delta H \quad (3.5)$$

где:  $c$  – коэффициент пропорциональности,

$Q$  – подача вентилятора,

$\Delta H$  – потери напора на дроссельной заслонке.

В случае применения регулирования скорости электродвигателя преобразователем частоты дроссельная заслонка полностью открыта и обеспечивается подача вентилятора  $Q_2$  и соответствующий напор  $H_2$ , что соответствует точке 3. В первом случае для создания такого же напора необходимо

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

дросселировать магистраль, что приведет к потерям мощности на дроссельной заслонке. Потери показаны красной областью на рис. 3.13.

Применение регулируемого электропривода с полностью открытой дроссельной заслонкой приводит к экономии электроэнергии за счет использования только полезной мощности – зеленая область.

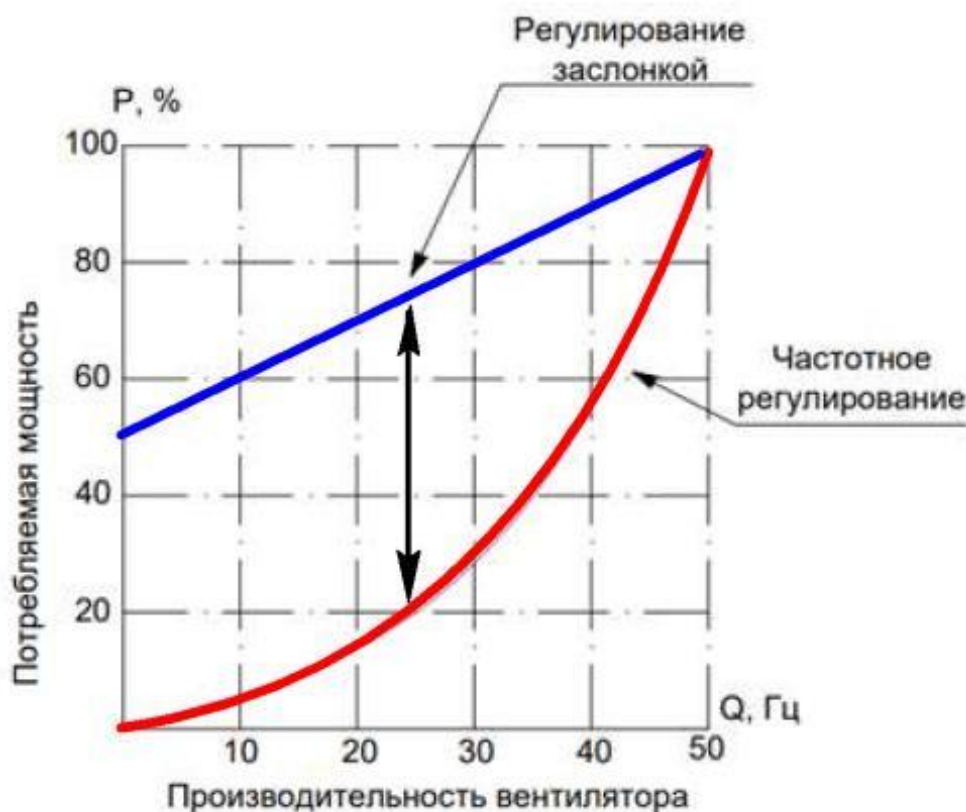


Рис. 3.14. Регулировочные характеристики вентилятора

Относительная экономия мощности при различной степени открытия дроссельной заслонки в сравнении с регулируемым электроприводом показана на рис. 3.14. Полное открытие заслонки соответствует нулевой экономии электроэнергии.

Таким образом, при применении частотного регулирования в системах управления влажностью, где статическая составляющая напора вентилятора является не основной, целесообразно применять регулируемый электропривод.

## 4. РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

### 4.1. Подключение ПЧ INNOVERT ISD mini к OPC Server

В данной ВКР ставится задача разработать программное обеспечение для взаимодействия системы и оператора. Одним из лучших вариантов является разработка SCADA-системы.

Большая часть имеющихся задач по автоматизации управления выполняется зачастую при помощи ПЛК, но частично выполнение задач может быть возложено и на SCADA-систему. Многие небольшие системы управления могут вообще не иметь ПЛК, поэтому промышленный компьютер, с установленной на него SCADA становится единственным средством управления процессом.

SCADA-системы помимо сбора данных и диспетчерского управления реализуют множество различных функций, далеко выходящих за рамки упомянутого выше определения. Функции SCADA-систем подразделяются на несколько групп [16]:

- адаптация SCADA-системы под решение стоящих задач;
- диспетчеризация объектов управления;
- автоматизация процесса управления;
- архивация истории протекающих процессов;
- работа с функциями безопасности;
- работа с общесистемными функциями.

Реализовывать поставленную в ВКР задачу решено в программе MasterSCADA. Данный программный продукт является бесплатным, с неограниченным числом тегов и одним OPC сервером. Имеется ограничение на

					<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>			<i>Разработка ПО для лабораторного стенда</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>					53	25
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сидирцева Н.Б.</i>				<i>БГТУ им. В.Г. Шухова ЭА-43</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>						

время работы в режиме исполнителя, равное 1 часу. По истечении этого времени требуется перезапустить режим исполнителя. Данная программа удовлетворяет требованиям к будущей системе. Настраивать ее мы будем используя интерфейс RS-485.

Сначала необходимо подключить ПЧ INNOVERT ISD mini и TPM101 к OPC серверу. В работе используется бесплатный Owen OPC Server. Запустим сервер, выберем порт, на котором находится наше устройство (рис. 4.1).

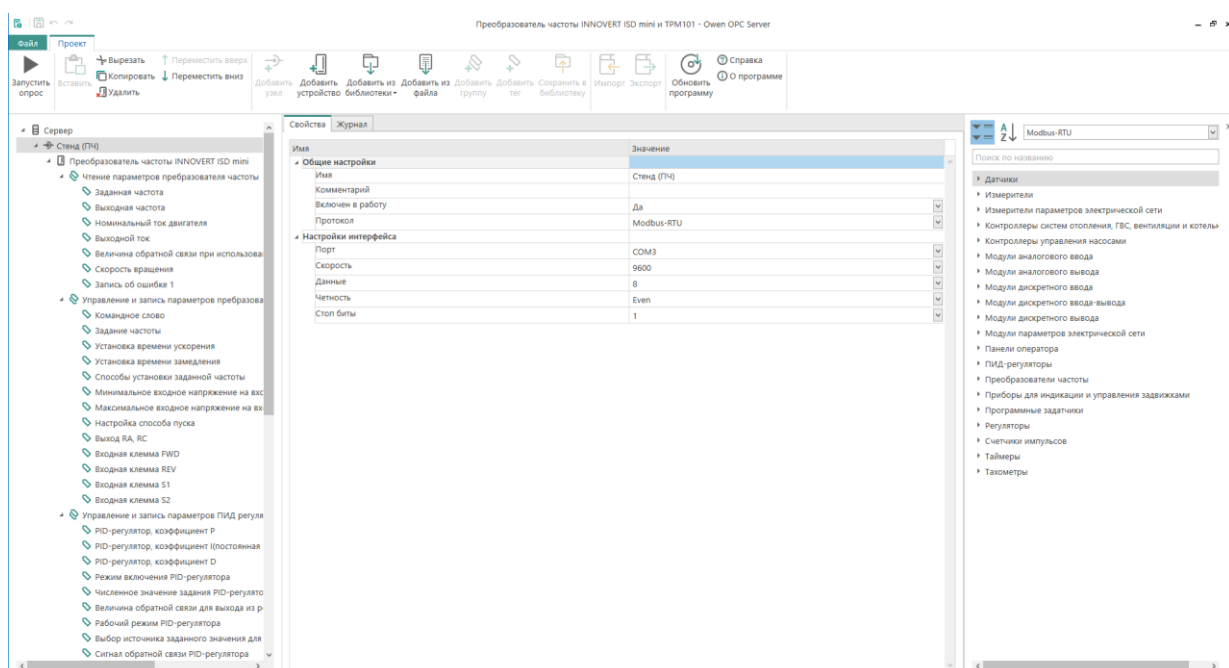


Рис. 4.1. Создание узла для подключения ПЧ INNOVERT ISD mini

После этого добавим наше устройство (рис. 4.2). Далее необходимо добавить теги, которые будут соответствовать переменным в прошивке настраиваемых устройств.



К созданному устройству добавляем 3 группы тегов:

- 1) Чтение параметров преобразователя частоты;
- 2) Управление и запись параметров преобразователя частоты;
- 3) Управление и запись параметров ПИД-регулятора.

Данные 3 группы наполняем тегами в соответствии с их предназначением. Каждый тег имеет свой адрес прошивки прибора. В общих настройках для первой группы тегов в строке «Тип доступа» указываем «Только чтение», а в остальных двух – «Чтение /запись»; для всех тегов в строке «Тип данных» указываем Word.

В настройках адресации для тегов из двух групп записи в строке «Функция записи» нужно указать 0x06; в строке «Регион» выбрать «Holding Registers» (рис. 4.3).

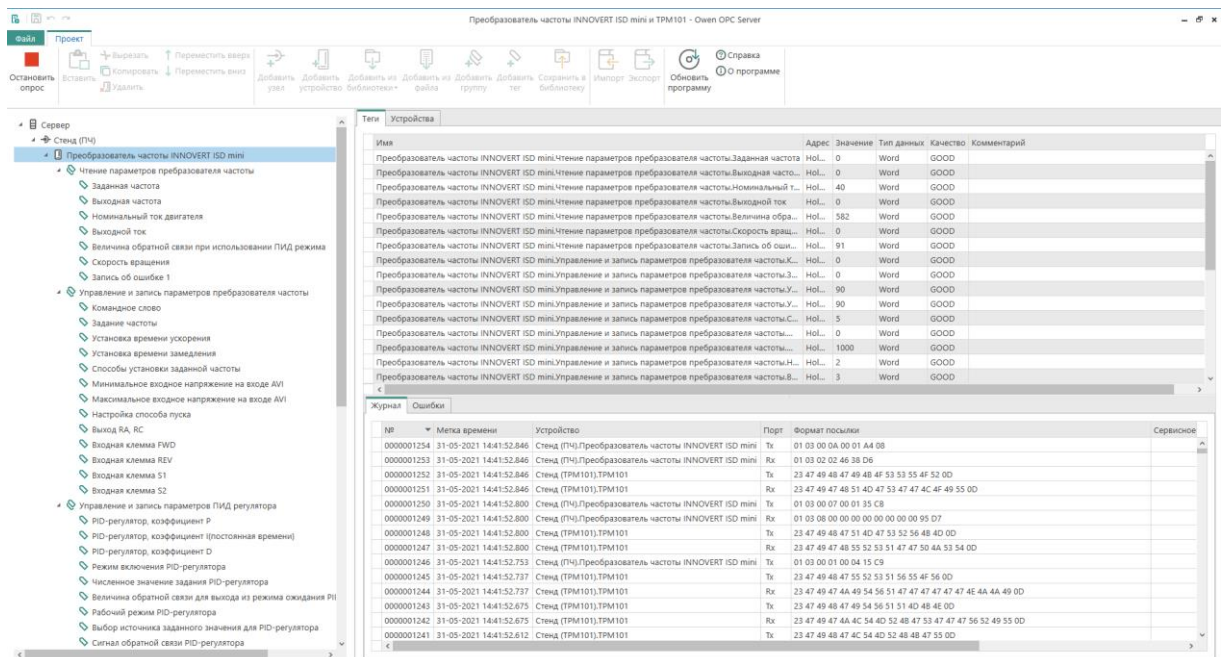


Рис. 4.3. ПЧ INNOVERT ISD mini , подключенный к OPC серверу

## 4.2. Подключение TPM101 к Owen OPC Server

Следующим действием будет подключение TPM101 к Owen OPC Server. Сначала произведем его настройку.





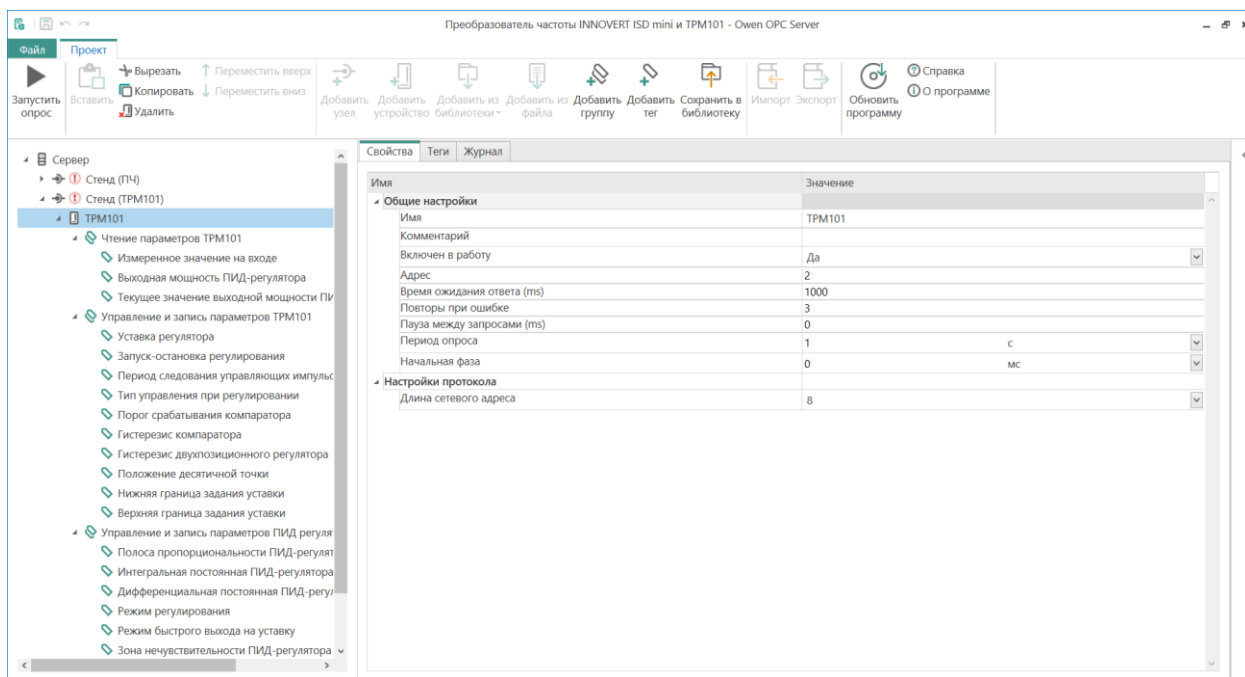


Рис. 4.5. Создание устройства для подключения TRM101

К созданному устройству добавляем 4 группы тегов:

- 1) Чтение параметров TRM101;
- 2) Управление и запись параметров TRM101;
- 3) Управление и запись параметров ПИД-регулятора;
- 4) О приборе.

Эти группы наполняем тегами. В общих настройках - первая и четвертая группы «Только чтение», а вторая и третья «Чтение/запись». Поскольку у TRM101 протокол работы - «ОВЕН», то теги имеют разные типы данных, а адрес тега («Имя параметра») задается буквенным обозначением. Каждый тег имеет свой адрес прошивки прибора (рис. 4.6). «Тип данных» и «Имя параметра» указываем в соответствии с руководством по эксплуатации TRM101 [14].

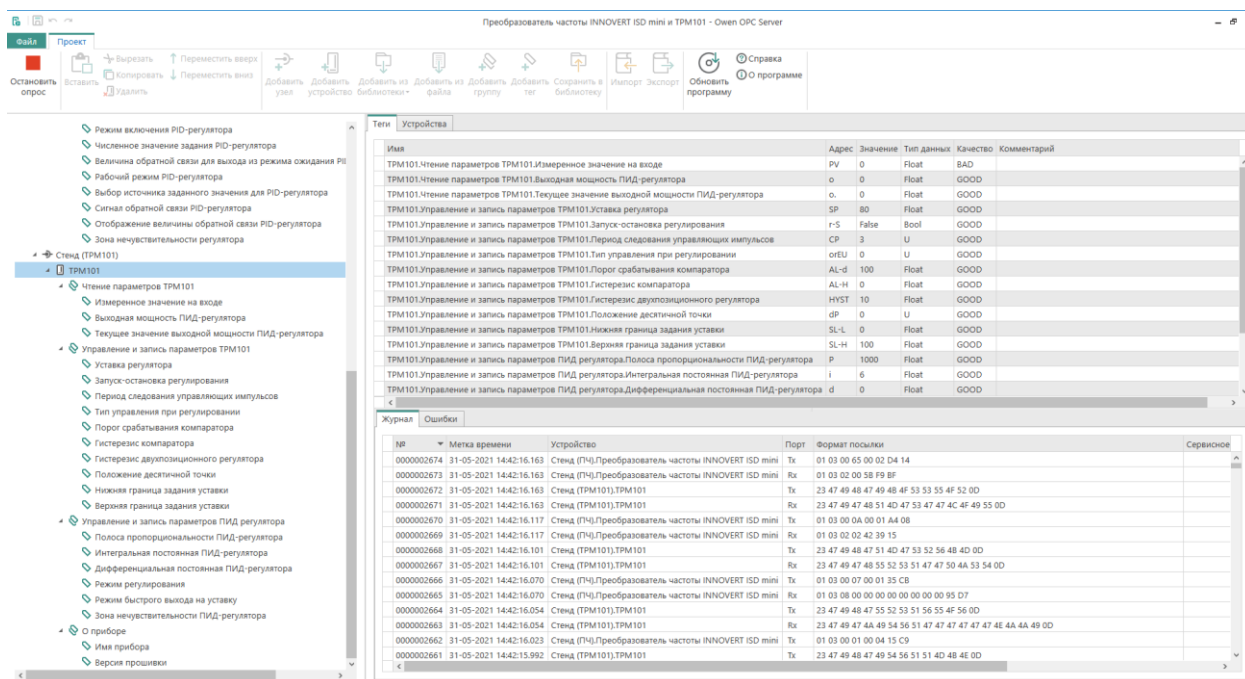


Рис. 4.6. TPM101, подключенный к OPC серверу

### 4.3. Разработка программы для ПЧ INNOVERT ISD mini

Прежде чем начать разработку ПО, нам необходимо связать OPC и SCADA-систему. Для этого в программе MasterSCADA в дереве системы добавляем «Компьютер», к нему «Owen OPC Server». Для добавленного в MasterSCADA сервера импортируем все теги из «Owen OPC Server».

В дереве объектов для главного объекта пишем название «Дипломный проект». К главному объекту добавляем дополнительные:

- 1) Стенд;
- 2) Командное слово;
- 3) Управление мнемосхемой.

В объекте «Стенд» будет содержаться мнемосхема, также элементная база стенда.

Для объекта «Командное слово» создаем объекты: «Упаковка 32 дискретных значений»; команды: «Пуск»; «Стоп»; «Смена направления»; «Вперёд»; «Назад».

Также создаем «Событие 1», «Событие 2», «Событие 3», «Событие 4». Тег «Результат» упаковки 32 дискретных значений нужно связать с параметром «Командное слово» в дереве системы. «Входы» упаковки 32 дискретных значений нужно связать с четырьмя созданными событиями в соответствии с инструкцией к преобразователю частоты [12].

«Вход0» связываем с «Событием 2» для работы кнопки «Стоп» (рис. 4.7).

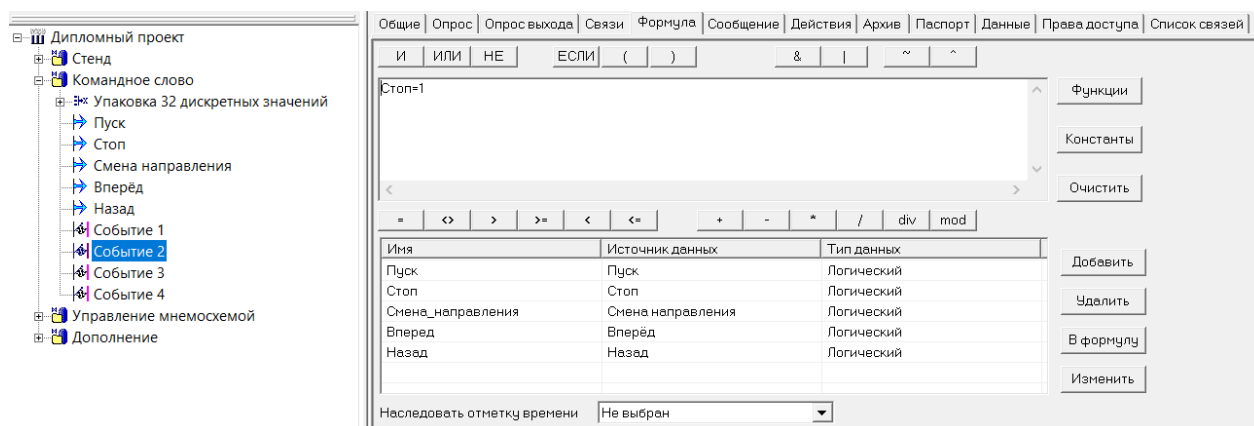


Рис. 4.7. Формула для кнопки стоп

«Вход1» связываем с «Событием 1» для работы кнопки «Пуск» (рис. 4.8).

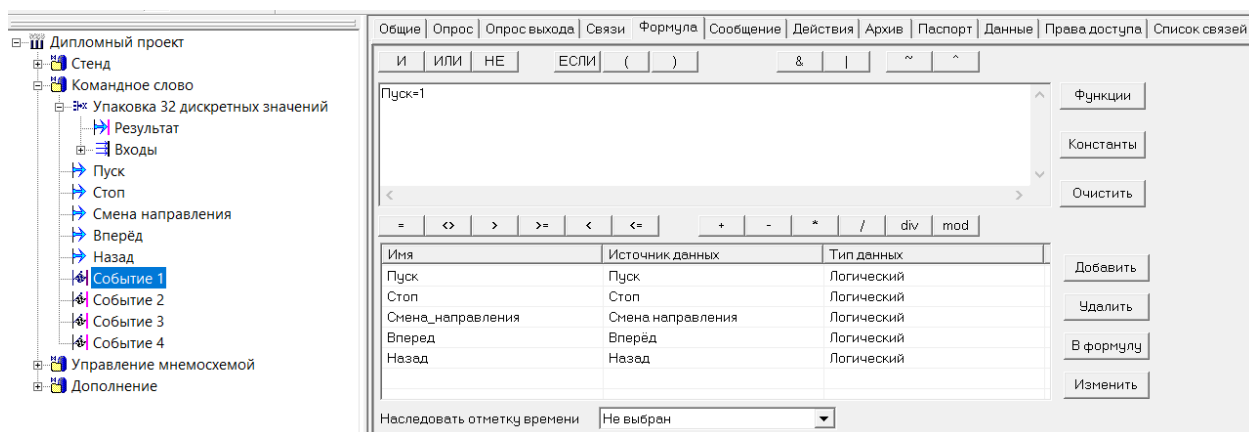


Рис. 4.8. Формула для кнопки пуск

«Вход3» связываем с «Событием 3» для работы кнопок: «Вперед» и «Смена направления» (рис. 4.9).

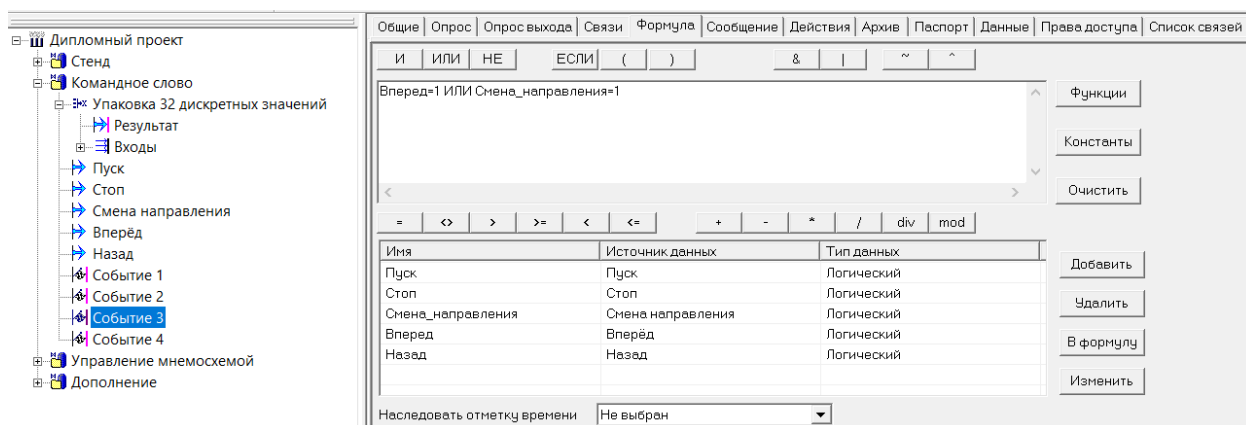


Рис. 4.9. Формула для кнопок вперед и смена направления

«Вход2» связываем с «Событием 4» для работы кнопок: «Назад» и «Смена направления» (рис. 4.10).

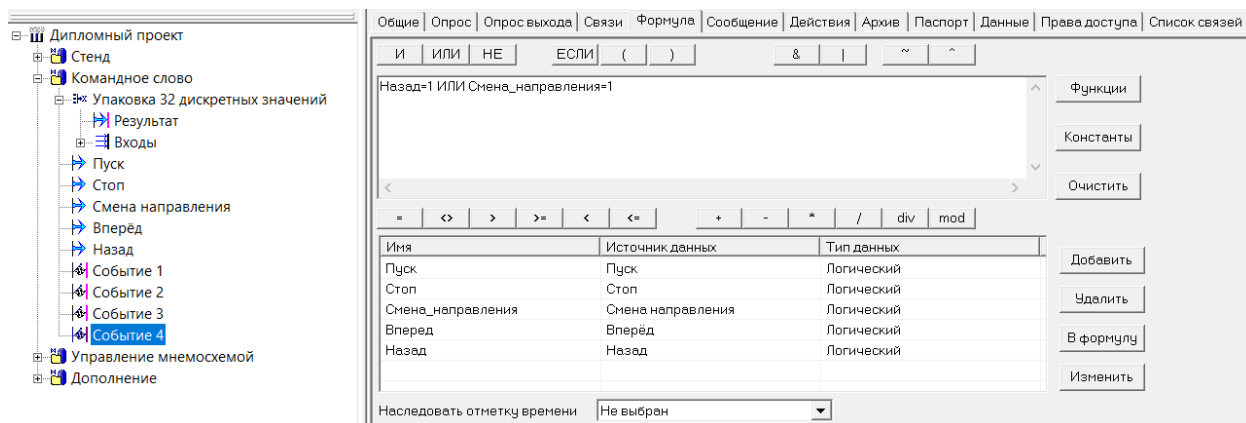


Рис. 4.10. Формула для кнопок назад и смена направления

С помощью приведенных выше формул необходимо связать четыре события с пятью предварительно созданными командами. Эти пять команд выносим на главную мнемосхему объекта «Стенд» для управления лабораторным стендом.

Объект «Управление мнемосхемой» необходим для динамического отображения главной мнемосхемы лабораторного стенда. В этом объекте мы создаем элемент «Триггер» для поддержания элементной базы стенда (вентиляторы, клапаны) в состоянии работы. Элемент «Триггер» имеет три команды: «Включить», «Отключить» и «Выход». Команду «Включить» связываем

с «Событием 1» из объекта «Командное слово». Команду «Отключить» связываем с «Событием 2». Команду «Выход» связываем с тегами, приводящими в работу динамические элементы стенда. С помощью вышеописанных действий мнемосхема будет включаться и отключаться при нажатии кнопок «Пуск» и «Стоп».

Для объекта «Стенд» создаем объект «Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini». У этого объекта создаем «Окно объекта» и «Основной журнал». В нем создаем «Графики регулируемых параметров для ПЧ»; «Коэффициенты ПИД-регулятора»; «Параметры двигателя»; «Состояние ошибок ПЧ».

Так как OPC Server имеет проблемы с чтением десятичных значений, поэтому к некоторым тегам мы добавляем формулы, чтобы привести значения в соответствие с отображаемыми на ПЧ значениями. Все добавляемые в дерево объектов теги должны быть связаны с соответствующими тегами в дереве системы, кроме четырех тегов объекта «Коэффициенты ПИД-регулятора».

К «Графикам регулируемых параметров для ПЧ» добавляем «Величину обратной связи при использовании ПИД-режима», к ней добавляем формулу (рис. 4.11); «Скорость вращения».

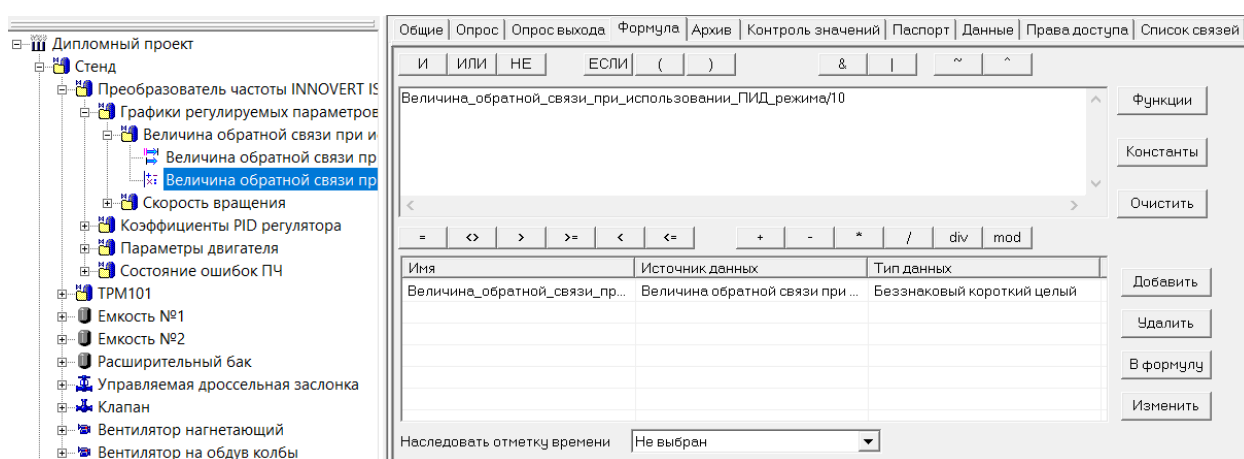


Рис. 4.11. Формула для величины обратной связи при использовании ПИД-режима

В «Графиках регулируемых параметров для ПЧ» будет присутствовать мнемосхема (рис. 4.12).

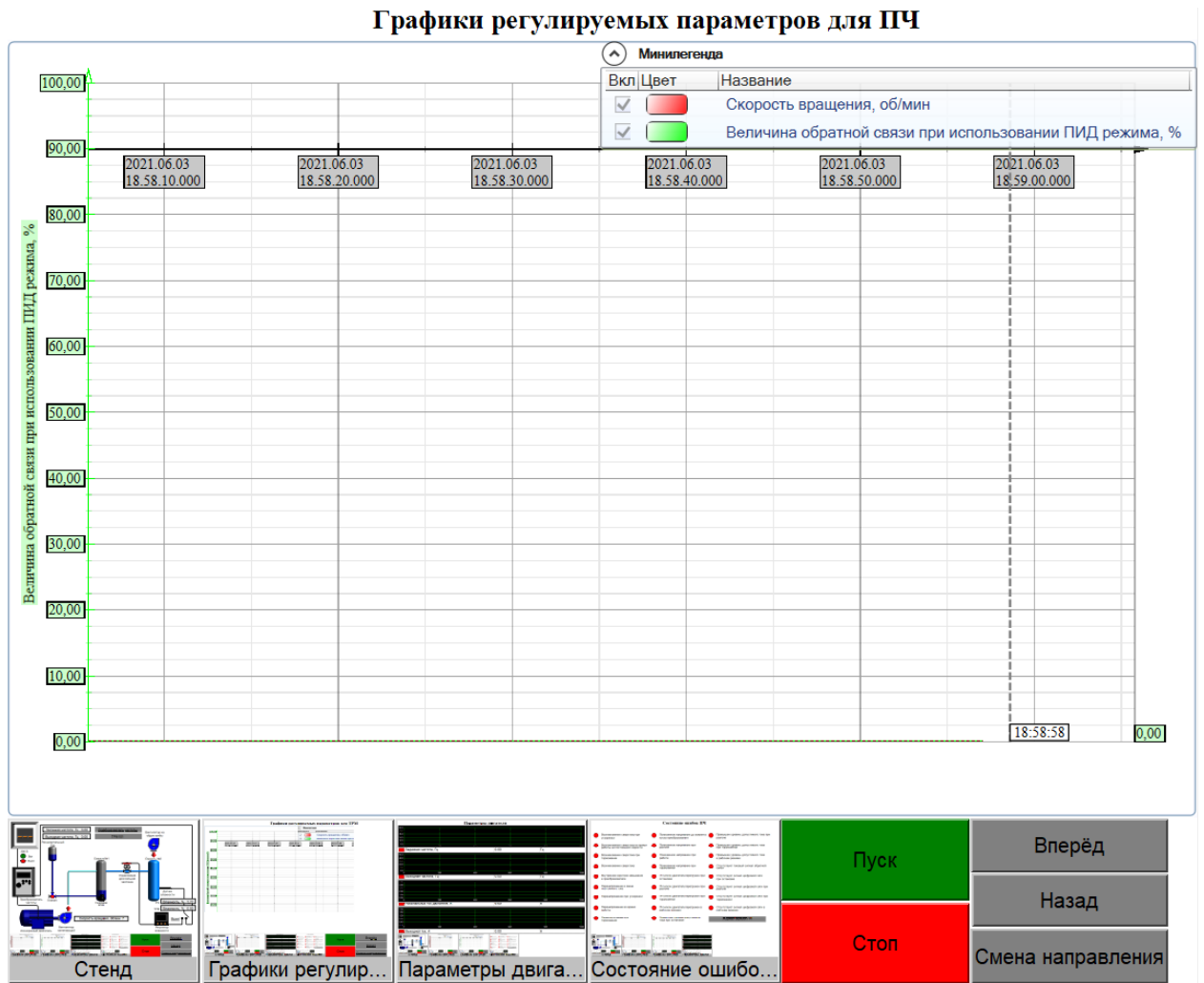


Рис. 4.12. Мнемосхема графиков регулируемых параметров для ПЧ

В «Коэффициентах ПИД-регулятора» есть «Коэффициент Р»; «Коэффициент I (постоянная времени)»; «Коэффициент D»; «Режим включения ПИД-регулятора» и «Численное значение задания ПИД-регулятора».

Все эти теги мы будем использовать для получения оптимального графика, поэтому для удобства мы вынесем их в созданное ранее «Окно объекта» преобразователя частоты и сделаем их в виде задатчиков (рис. 4.13).

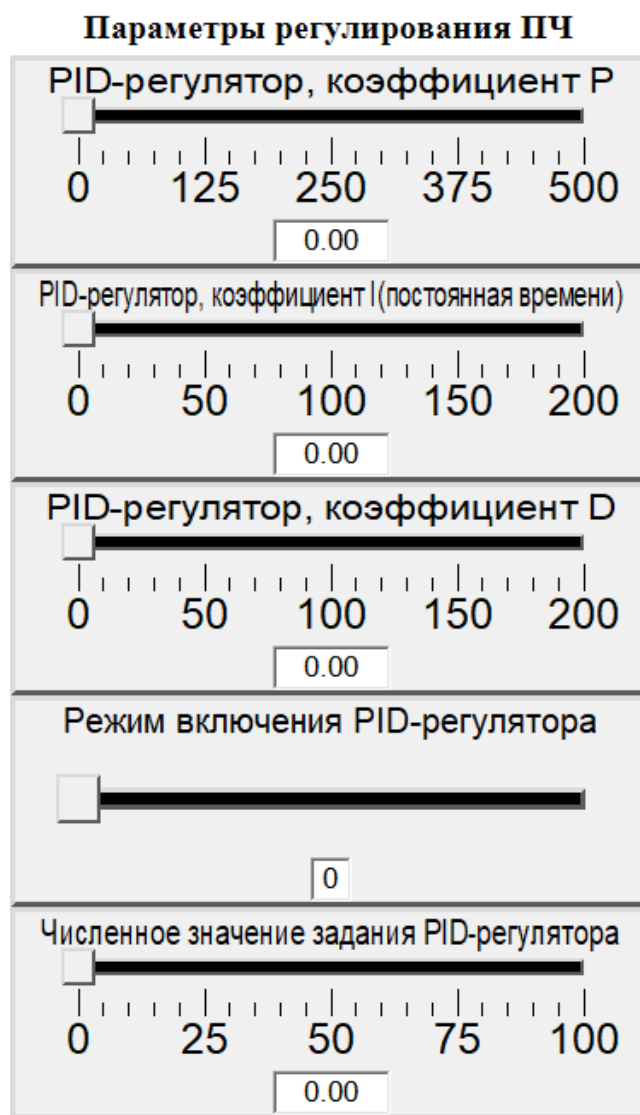


Рис. 4.13. Окно объекта ПЧ

У всех значений, кроме значения «Режим включения ПИД-регулятора», добавляем формулы (рис. 4.14 - рис. 4.17).

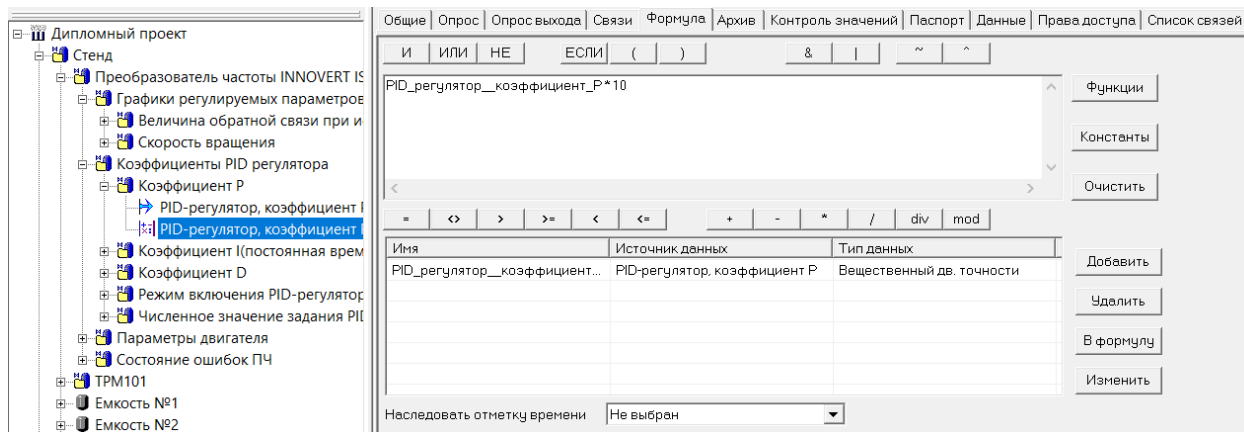


Рис. 4.14. Формула для коэффициента P



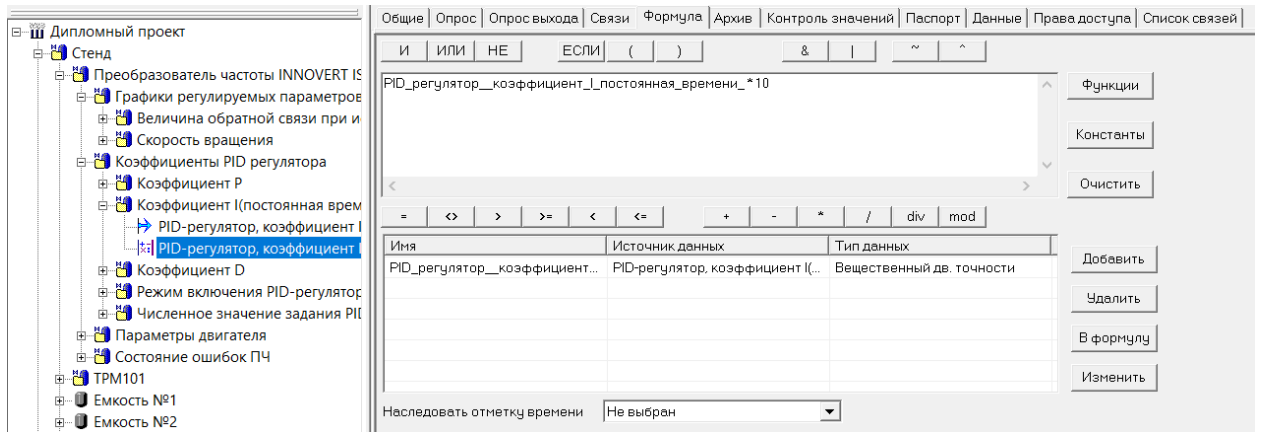


Рис. 4.15. Формула для коэффициента I

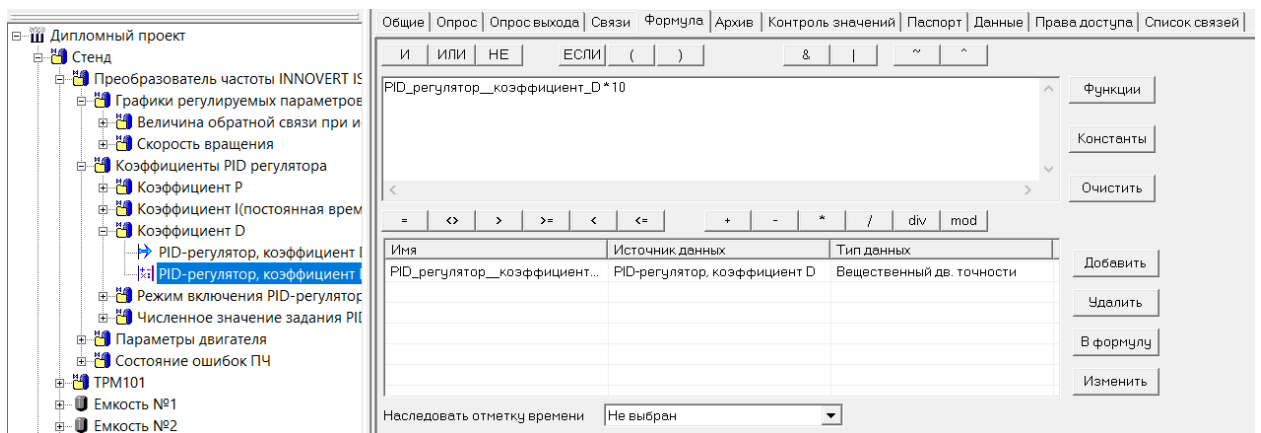


Рис. 4.16. Формула для коэффициента D

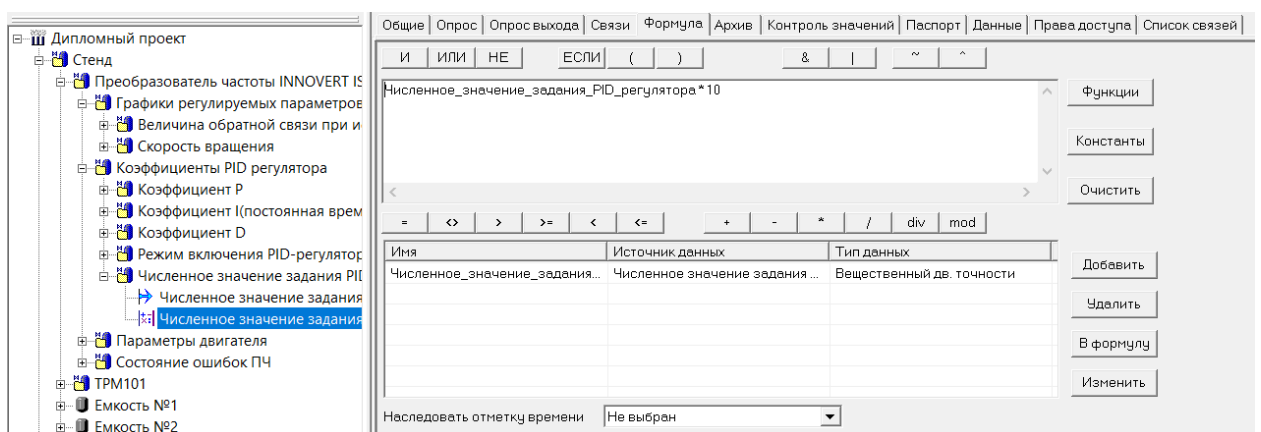


Рис. 4.17. Формула для численного значения задания PID регулятора

Формулы, добавленные для значений, должны быть связаны с соответствующими значениями в дереве системы для того, чтобы задатчики было проще использовать и они корректно и понятно отображали введенное значение требуемой величины.

Для «Параметра двигателя» добавляем: «Заданную частоту»; «Выходную частоту»; «Выходной ток»; «Номинальный ток двигателя». У объекта «Параметры двигателя» присутствует мнемосхема (рис. 4.18). На ней будут отображены все перечисленные выше параметры в виде графиков.

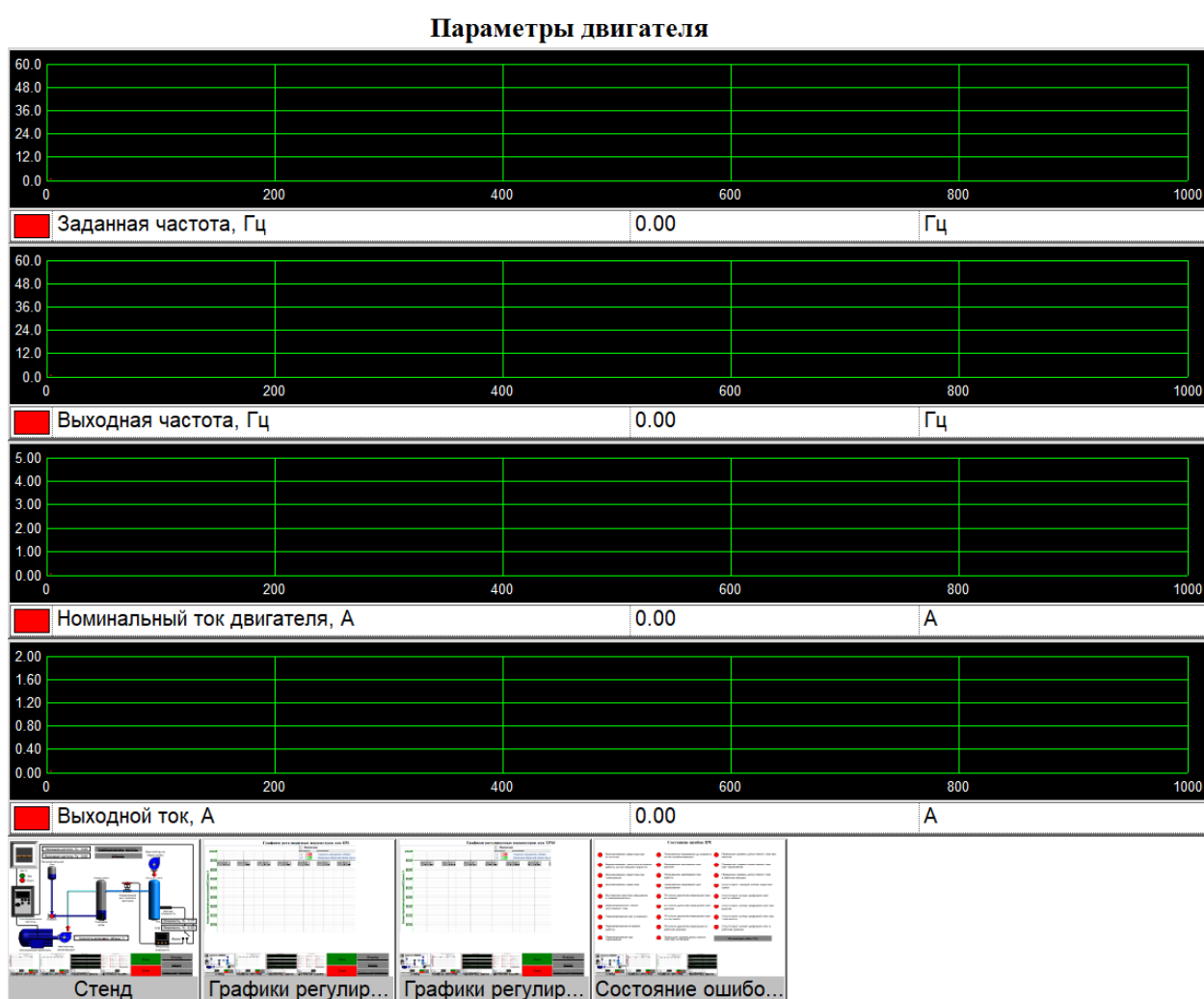


Рис. 4.18. Мнемосхема параметров двигателя

Для всех параметров объекта «Параметры двигателя» добавляем формулы (рис. 4.19 - рис. 4.22).



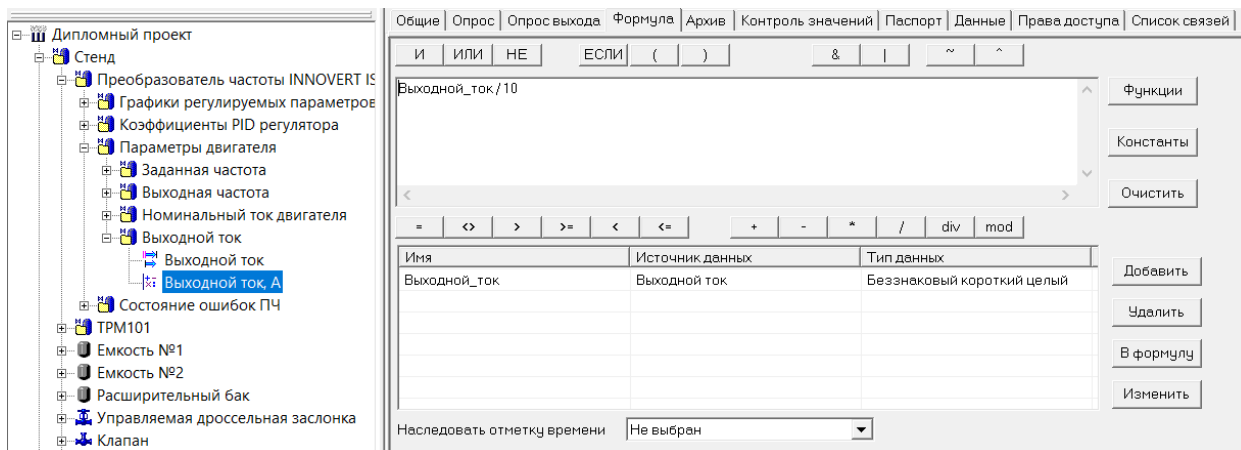


Рис. 4.22. Формула для выходного тока

Для объекта «Состояние ошибок ПЧ» добавляем значения «Запись об ошибке» 1 и множество событий, обозначающих ошибки, аварии, критические состояния преобразователя частоты. У объекта «Состояние ошибок» также присутствует мнемосхема. На ней будут вынесены все события, сообщающие об ошибках в работе ПЧ (рис. 4.23).

#### Состояние ошибок ПЧ

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока при ускорении                          | <input type="radio"/> Пониженное напряжение до момента пуска преобразователя | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при разгоне      |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока во время работы на постоянной скорости | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при разгоне                      | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при торможении   |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока при торможении                         | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при работе                       | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока в рабочем режиме |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока  | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при торможении                   | <input type="radio"/> Отсутствует токовый сигнал обратной связи          |
| <input type="radio"/> Внутреннее короткое замыкание в преобразователе                | <input type="radio"/> ПЧ и/или двигатель перегружен при остановке            | <input type="radio"/> Отсутствует сигнал цифровой сети при остановке     |
| <input type="radio"/> Перенапряжение в звене постоянного тока                        | <input type="radio"/> ПЧ и/или двигатель перегружен при разгоне              | <input type="radio"/> Отсутствует сигнал цифровой сети при разгоне       |
| <input type="radio"/> Перенапряжение при ускорении                                   | <input type="radio"/> ПЧ и/или двигатель перегружен при торможении           | <input type="radio"/> Отсутствует сигнал цифровой сети при торможении    |
| <input type="radio"/> Перенапряжение во время работы                                 | <input type="radio"/> ПЧ и/или двигатель перегружен в рабочем режиме         | <input type="radio"/> Отсутствует сигнал цифровой сети в рабочем режиме  |
| <input type="radio"/> Перенапряжение при торможении                                  | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при остановке        |  |

Журнал ошибок ПЧ

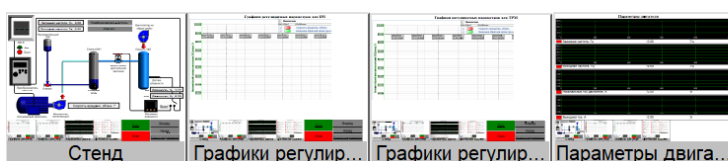


Рис. 4.23. Мнемосхема состояния ошибок

Для всех событий, сообщающих об ошибках ПЧ, добавляем формулы (рис. 4.24).

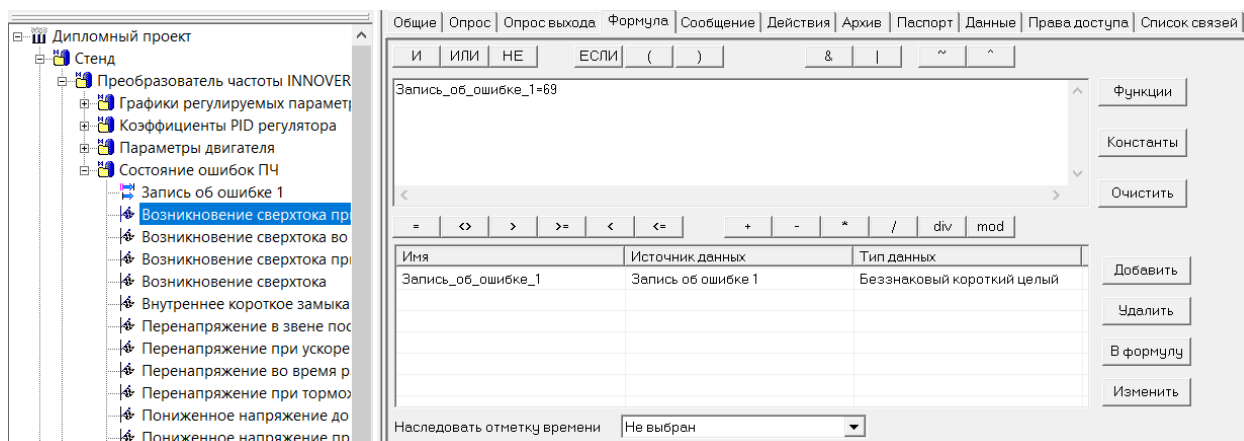


Рис. 4.24. Пример формулы для ошибки ПЧ

Также мы должны написать сообщения, которые будут появляться при возникновении какой-либо из ошибок (рис. 4.25).

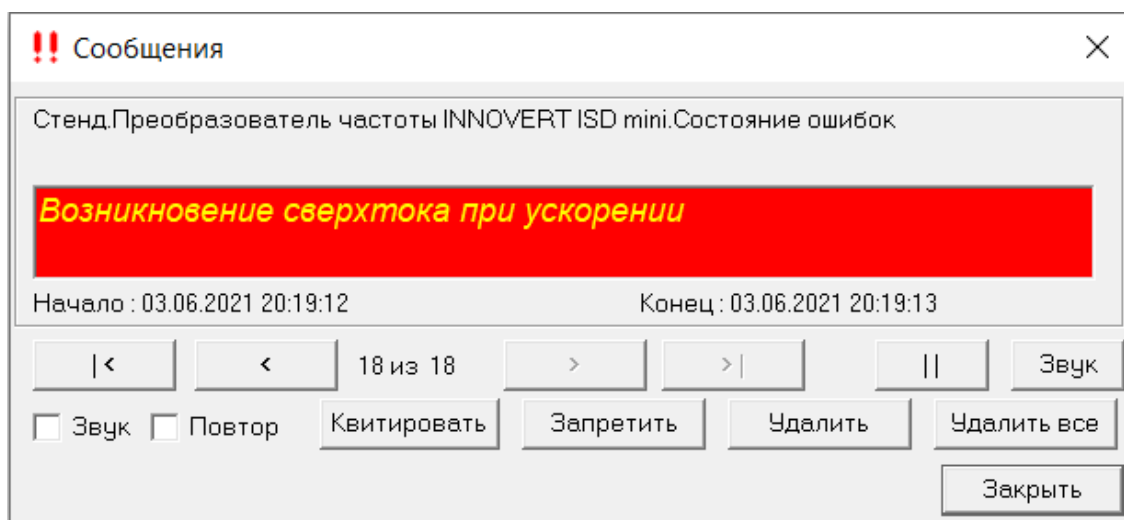


Рис. 4.25. Пример всплывающего окна ошибки

Помимо этого, нужно указать в строке «Категория» для всех событий - категорию «Авария ПЧ». Данную категорию мы создали для объекта «Система» в дереве системы во вкладке «Сообщение». Там же можно указать текст и фон сообщений данной категории.

Ранее созданный «Основной журнал» для объекта «Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini» отфильтруем таким образом, чтобы он фиксировал только ошибки ПЧ (рис. 4.26).

Квит	Начало	Конiec	Сообщение	Источник	Объект
✓	03.06.2021 20:27:23	03.06.2021 20:27:24	Отсутствует сигнал цифровой сети в раб	Отсутствует сигнал цифровой сети в раб	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:19	03.06.2021 20:27:20	Отсутствует сигнал цифровой сети при п	Отсутствует сигнал цифровой сети при п	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:16	03.06.2021 20:27:17	Превышен уровень допустимого тока при	Превышен уровень допустимого тока при	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:11	03.06.2021 20:27:12	ПЧ и/или двигатель перегружен при разг	ПЧ и/или двигатель перегружен при разг	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:07	03.06.2021 20:27:08	Пониженное напряжение при работе	Пониженное напряжение при работе	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:03	03.06.2021 20:27:04	Пониженное напряжение при разгоне	Пониженное напряжение при разгоне	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:27:01	03.06.2021 20:27:02	Перенапряжение в звене постоянного то	Перенапряжение в звене постоянного то	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:26:57	03.06.2021 20:26:58	Возникновение сверхтока при торможени	Возникновение сверхтока при торможени	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
✓	03.06.2021 20:23:01	03.06.2021 20:23:02	Возникновение сверхтока при ускорении	Возникновение сверхтока при ускорении	Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ
03.06.2021 19:38:54 03.06.2021 19:40:44 Возникновение сверхтока при ускорении Стенд Преобразователь частоты INNOVERT ISD mini Состояние ошибок ПЧ					

Рис. 4.26. Журнал ошибок

Кнопку перехода на журнал ошибок ПЧ расположим на мнемосхеме «Состояние ошибок ПЧ».

#### 4.4. Разработка программы для ТРМ101

В дереве объектов «Дипломный проект» для объекта «Стенд» добавляем «ТРМ101». У этого объекта создаем «Окно объекта». В нем создаем «Графики регулируемых параметров для ТРМ101»; «Коэффициенты ПИД-регулятора»; «Управление регулированием».

К «Графикам регулируемых параметров для ТРМ101» добавляем «Величину обратной связи при использовании ПИД-режима»; «Скорость вращения». В «Графиках регулируемых параметров для ТРМ101» будет присутствовать мнемосхема (рис. 4.27).

### Графики регулируемых параметров для ТРМ101

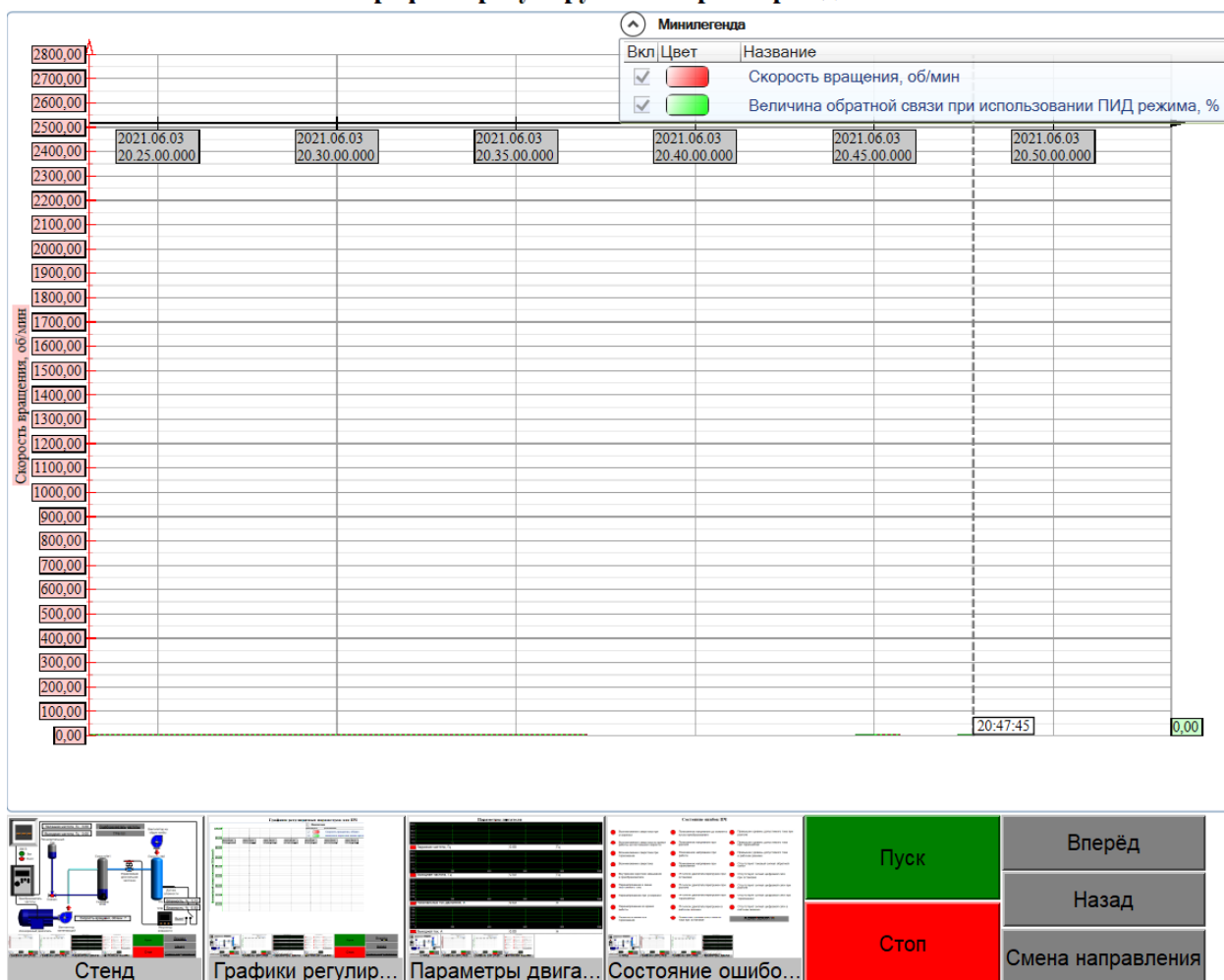


Рис. 4.27. Мнемосхема графиков регулируемых параметров для ТРМ101

В «Коэффициентах ПИД-регулятора» есть «Коэффициент Р»; «Коэффициент I (постоянная времени)»; «Коэффициент D»; «Режим включения ПИД-регулятора» и «Численное значение задания ПИД-регулятора».

Все эти теги мы будем использовать для получения оптимального графика, поэтому для удобства мы вынесем их в созданное ранее «Окно объекта» для ТРМ101 и сделаем их в виде задатчиков (рис. 4.28).

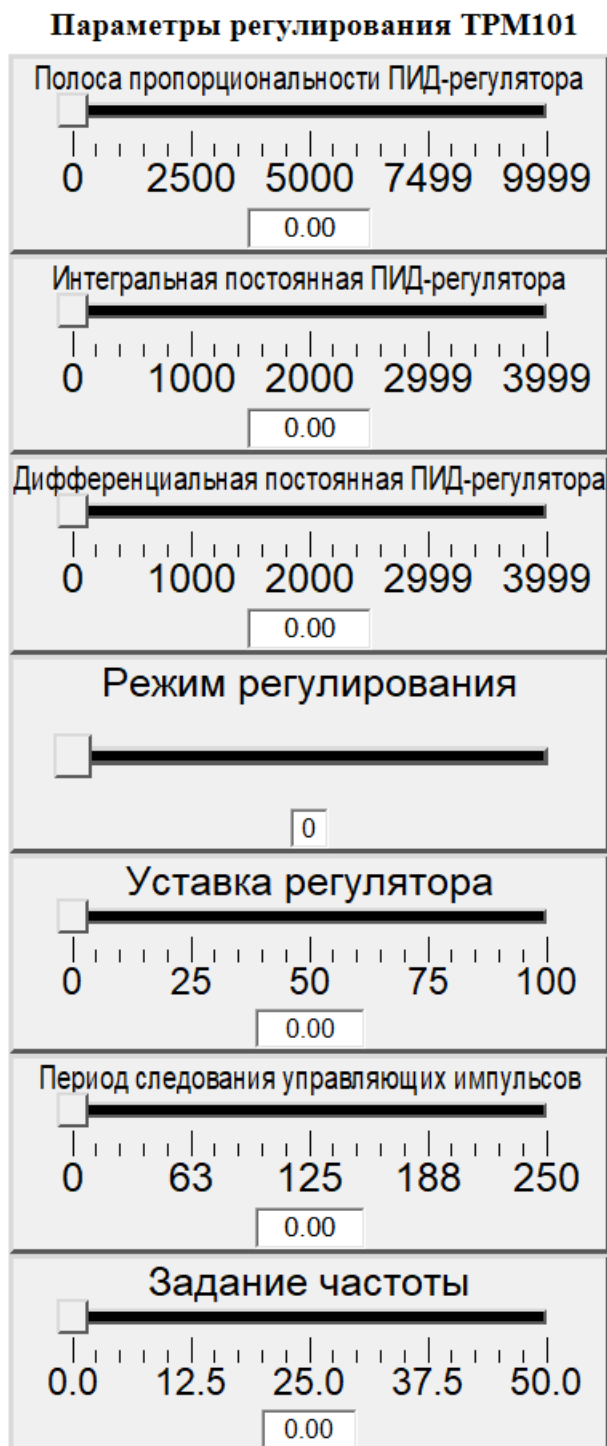


Рис. 4.28. Окно объекта ТРМ101

К «Управлению регулированием» добавляем: «Управление ТРМ101»; «Период следования управляющих импульсов» и «Задание частоты».

«Управление ТРМ101» вынесем на главную мнемосхему в виде кнопки для включения и отключения ТРМ101.



Теги «Период следования управляющих импульсов» и «Задание частоты» мы вынесем на «Окно объекта» ТРМ101 к уже вынесенным коэффициентам ПИД регулятора, также сделаем их в виде задатчиков. Параметр «Задание частоты» будет содержать формулу (рис. 4.29).

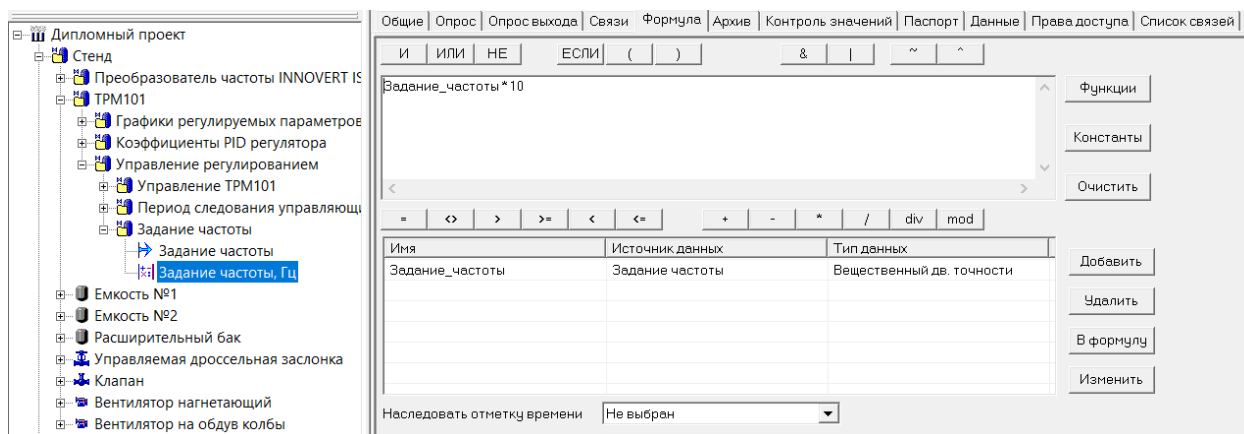


Рис. 4.29. Формула для задания частоты

Формулы, добавленные для значений, должны быть связаны с соответствующими значениями в дереве системы.

#### 4.5. Создание мнемосхемы для стенда

Создаем мнемосхему для лабораторного стенда. Отображаем на ней всю элементную базу стенда. Для построения мнемосхемы мы использовали графические примитивы и исполнительные объекты из библиотек MasterSCADA. Добавляем переходы на другие созданные мнемосхемы: «Графики регулируемых параметров для ПЧ»; «Графики регулируемых параметров для ТРМ101»; «Параметры двигателя»; «Состояние ошибок ПЧ».

На главную мнемосхему добавлены семь исполняющих устройств:

- 1) Емкость №1;
- 2) Емкость №2;

- 3) Расширительный бак;
- 4) Управляемая дроссельная заслонка;
- 5) Клапан;
- 6) Вентилятор нагнетающий;
- 7) Вентилятор на обдув колбы.

Емкость №1 нужна для генерации пара из воды с помощью генератора влаги.

Емкость №2 нужна для имитации помещения, в котором необходимо регулировать уровень влажности.

Расширительный бак содержит дополнительный объем воды для ее долива в емкость №1 при критическом снижении уровня жидкости.

Управляемая дроссельная заслонка необходима для передачи водяного пара из генерирующей емкости №1 в регулируемую емкость №2. Управляется с помощью регулятора влажности ТРМ101.

Клапан служит для контролируемого долива воды из расширительного бака в емкость №1.

Вентилятор нагнетающий служит для нагнетения воздуха в емкость №1 и для последующего перемещения водяного пара.

Вентилятор на обдув колбы создает возмущающее воздействие в емкости №2, имитирует сквозной поток воздуха, который является помехой при поддержании уровня влажности.

На рис. 4.30 можно увидеть отображение главной мнемосхемы до включения.

					ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

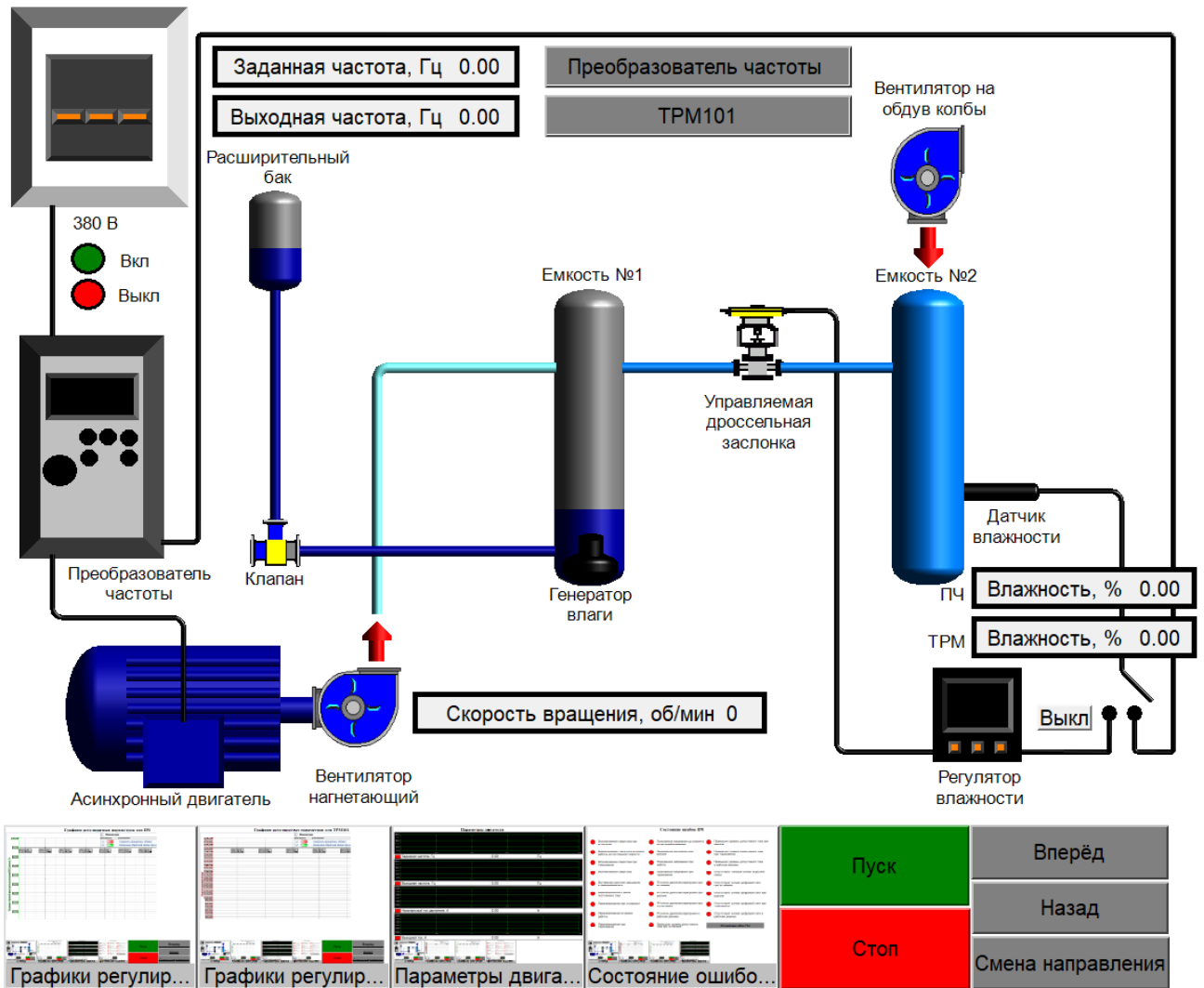


Рис. 4.30. Главная мнемосхема до включения

На рис. 4.31 можно увидеть отображение главной мнемосхемы после включения.

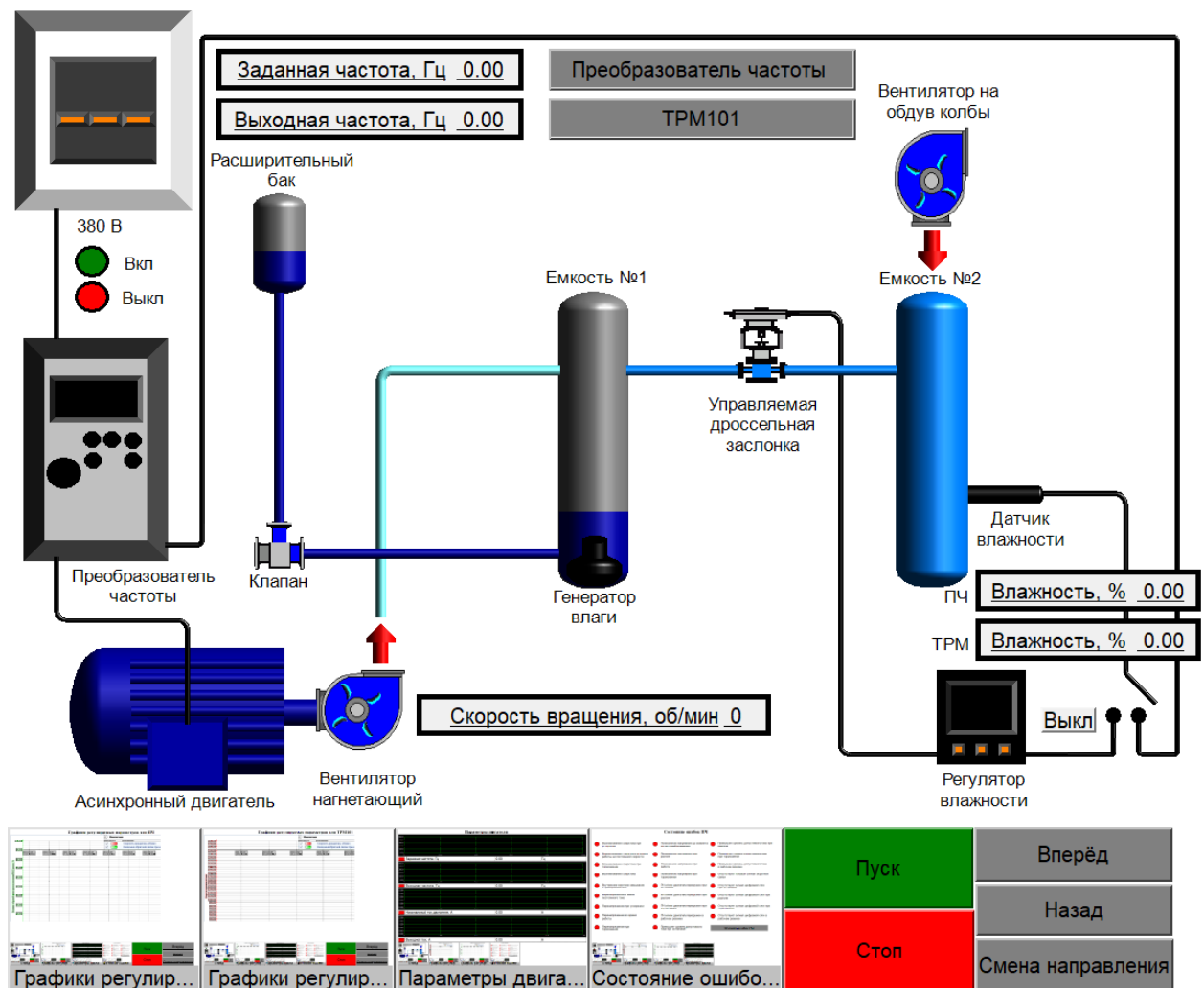


Рис. 4.31. Главная мнемосхема после включения

При нажатии кнопки «Пуск» оба вентилятора начинают вращаться, а клапаны изменяют цвет, что обозначает их открытие.

При нажатии кнопки «Стоп» вентиляторы прекращают вращение, а клапаны возвращаются в исходное состояние.

На главную мнемосхему также выносим первоочередные параметры для регулирования влажности: заданная частота; выходная частота; скорость вращения; уровень влажности при регулировании с помощью ПЧ INNOVERT ISD mini и уровень влажности при регулировании с помощью TRM101.

Еще на мнемосхеме присутствуют кнопки для перехода на окна объектов преобразователя частоты и ТРМ101, содержащие задатчики для задания параметров ПИД-регулирования.

При нажатии на первую кнопку перехода на дополнительные мнемосхемы мы осуществляем переход на мнемосхему «Графики регулируемых параметров для ПЧ». Там мы видим тренд с вынесенными на него параметрами регулирования (скорость вращения и величина обратной связи при использовании ПИД режима). Здесь также присутствуют кнопки для управления преобразователем частоты.

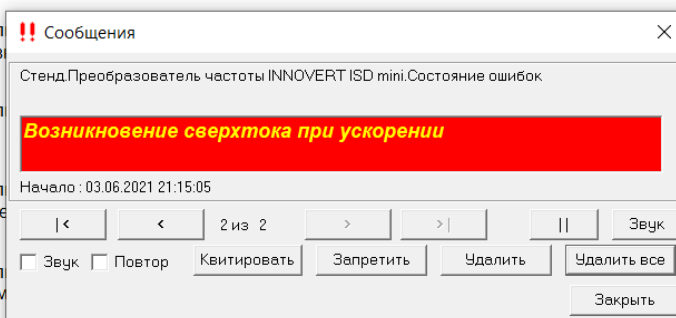
При нажатии на вторую кнопку перехода мы попадаем на «Графики регулируемых параметров для ТРМ101». Там мы видим тренд с вынесенными на него параметрами регулирования (скорость вращения и величина обратной связи при использовании ПИД режима). Эта мнемосхема аналогична предыдущей.

При нажатии на третью кнопку перехода мы попадаем на мнемосхему «Параметры двигателя». Здесь в виде графиков с периодом 1000 секунд мы видим основные параметры двигателя: заданная частота; выходная частота; номинальный ток двигателя; выходной ток.

При нажатии на четвертую кнопку мы попадаем на мнемосхему «Состояние ошибок ПЧ». Здесь мы видим вынесенные индикаторы ошибок ПЧ INNOVERT ISD mini, а также кнопку перехода на «Журнал ошибок ПЧ». При появлении аварийной ситуации преобразователя частоты загорится один из индикаторов на этой мнемосхеме, также ошибка будет записана в «Журнал ошибок», где можно будет изучить ее более детально (рис. 4.32).

### Состояние ошибок ПЧ

- |  |  |  |
|--|--|--|
| <input checked="" type="radio"/> Возникновение сверхтока при ускорении               | <input type="radio"/> Пониженное напряжение до момента пуска преобразователя | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при разгоне      |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока во время работы на постоянной скорости | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при разгоне                      | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при торможении   |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока при торможении                         | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при работе                       | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока в рабочем режиме |
| <input type="radio"/> Возникновение сверхтока  | <input type="radio"/> Пониженное напряжение при торможении                   | <input type="radio"/> Отсутствует токовый сигнал обратной связи          |
| <input type="radio"/> Внутреннее короткое замыкание в преобразователе                | <input type="radio"/> ПЧ и/или останов                                       |  |
| <input type="radio"/> Перенапряжение в звене постоянного тока                        | <input type="radio"/> ПЧ и/или разгоне                                       |  |
| <input type="radio"/> Перенапряжение при ускорении                                   | <input type="radio"/> ПЧ и/или торможении                                    |  |
| <input type="radio"/> Перенапряжение во время работы                                 | <input type="radio"/> ПЧ и/или рабочем                                       |  |
| <input type="radio"/> Перенапряжение при торможении                                  | <input type="radio"/> Превышен уровень допустимого тока при остановке        |  |



Журнал ошибок ПЧ

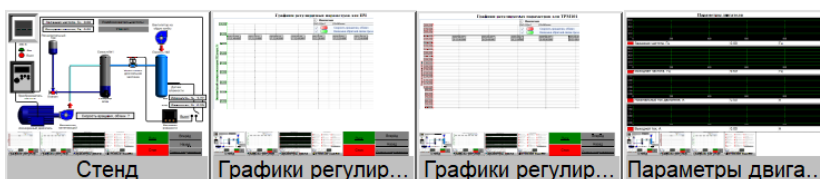


Рис. 4.32. Мнемосхема состояния ошибок при возникновении ошибки

При помощи созданных мнемосхем мы можем оперативно отслеживать работу лабораторного стенда, управлять им и вовремя получать информацию о возникших ошибках и устранять их.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе написания данной выпускной квалификационной работы на кафедре БГТУ им. Шухова была произведена автоматизация лабораторного стенда, подключение его к компьютеру через интерфейс RS-485 и снятие графиков регулирования влажности с помощью таких программ как OPC сервер и MasterSCADA. Были получены навыки подключения частотного преобразователя к компьютеру и снятие характеристик через ПО MasterSCADA. Проверочные графики, полученные с помощью ПО MasterSCADA, подтвердили работоспособность программы и достоверность как заданных значений, так и результатов, переданных на ПК. В познавательных целях была проверена возможность пуска, реверса и остановки двигателя с помощью связи «ПК» - «RS-485» - «ПЧ».

Была разработана программа, считывающая параметры двигателя, возможные ошибки, возникающие на преобразователе частоты, реализовано задание коэффициентов ПИД-регулятора с помощью задатчиков. Также в программе реализована функция включения и отключения регулирования ТРМ101, была построена мнемосхема с динамическим изменением состояний исполнительных механизмов.

В ходе исследования были выполнены все поставленные задачи, был произведен теоретический расчет для построения модели системы регулирования влажности. Также были сняты характеристики переходных процессов и характеристика для получения уровня влажности 60% и 80%.

Таким образом нами была достигнута цель, которая заключалась в сравнении двух методов регулирования влажности. Первый метод заключался в регулировании влажности с помощью преобразователя частоты. Вторым методом

					<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>			<i>Заключение</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>					79	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сибирцева Н.Б.</i>				<i>БГТУ им. В.Г. Шухова</i> <i>ЭА-43</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>						

заклучался в регулировании влажности с помощью управляемой дроссельной заслонки.

Система регулирования влажности имеет огромное значение. Так хранение произведений искусства и книг требует поддержания влажности воздуха на необходимом уровне. Продукты питания, строительные материалы и даже многие электронные компоненты допускается хранить в строго определённом диапазоне относительной влажности воздуха. С помощью регулирования влажности удаётся существенно продлить срок хранения овощей, фруктов и других товаров. Уровень влажности в помещении также влияет на качество продукции.

По данным, полученным в ходе снятия регулировочных характеристик, мы можем сделать вывод, что метод регулирования влажности с помощью преобразователя частоты INNOVERT ISD mini наиболее прост, технически удобен и, самое главное, эффективен вследствие работы только с помощью полезной мощности. Метод регулирования заслонкой имеет большие потери мощности для достижения тех же значений регулирования при регулировании в широком диапазоне. Но при необходимости регулирования в узком диапазоне предпочтительней будет метод регулирования заслонкой, так как преобразователь частоты на крупном предприятии будет стоить дорого и не оработает затраченных на него средств.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинер М. А., Измерения влажности. – М.: Изд-во Энергия, 1973. – 400с.
2. Власов К. П., Теория автоматического управления. Учебное пособие. – Х.: Изд-во Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.
3. Ключев В. И., Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Изд-во Энергоатомиздат., 1985. – 560 с.
4. Костырко К., Измерение и регулирование влажности в помещениях. / Костырко К., Околович-Грабовска Б. – М.: Изд-во Стройиздат., 1982. – 212 с.
5. Кудинов Ю. И., Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) / Кудинов Ю. И., Пащенко Ф. Ф., – М.: Изд-во Лань, 2021. – 308 с.
6. Онищенко Г. Б., Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. / Онищенко Г. Б., Локтева И. Л., – М.: Изд-во Энергия, 1979. – 200 с.
7. Осипов О. И., Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 80 с.
8. Ротач В. Я., Теория автоматического управления. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
9. Терехов В. М., Системы управления электроприводов. / Терехов В. М., Осипов О. И., – М.: Изд-во Академия, 2005. – 304 с.
10. Чиликин М. Г., Общий курс электропривода. / Чиликин М. Г., Сандлер А. С., – М.: Изд-во Энергоиздат., 1981. – 577 с.
11. Ющенко Л. В., Асинхронные двигатели с фазным ротором и схемы управления. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 1999. – 88 с.

					<i>ВКР 13.03.02 № 3254 - 2021 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Пономарев И.Э.</i>			<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Лимаров А.И.</i>				81	2
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сибирцева Н.Б.</i>			<i>БГТУ им. В.Г. Шухова ЭА-43</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Белоусов А.В.</i>					
<i>Список литературы</i>							

12. Быстрый пуск INNOVERT ISD mini. Управление через Modbus-RTU [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: <https://www.prst.ru/docs/innovert/innovert-modbus-rtu> (дата обращения: 15.04.21).

13. Преобразователь давления ПД 150 [Электронный ресурс] / ОВЕН // ОВЕН. Преобразователи давления. — Режим доступа: URL: <https://owen.ru/product/pd150/documentation> (дата обращения: 18.05.21).

14. ПИД-регулятор ТРМ101 [Электронный ресурс] / ОВЕН // ОВЕН. Измерители-регуляторы. — Режим доступа: URL: [https://owen.ru/product/trm101/documentation\\_and\\_software](https://owen.ru/product/trm101/documentation_and_software) (дата обращения: 6.05.21).

15. Инструкция INNOVERT ISD mini [Электронный ресурс] — Режим доступа: URL: <http://innovert.ru/innovert/> (дата обращения: 28.04.21).

16. MasterSCADA 3.X [Электронный ресурс] / ОВЕН // ОВЕН. SCADA системы. — Режим доступа: URL: [https://owen.ru/product/master\\_scada/video\\_examples](https://owen.ru/product/master_scada/video_examples) (дата обращения: 25.04.21).