

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Энергетический институт

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка и исследование системы управления преобразователем частоты вентилятора для поддержания температуры
УДК 621.314.26.001:621.63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5А	Асылханов А.Б.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Шилин А.А.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и
ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав.кафедрой ЭПЭО доцент	Дементьев Ю.Н.	К.Т.Н.		

Томск – 2017 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень используемых сокращений.....	
ВВЕДЕНИЕ	1
1. Введение в проблему и постановка задачи	3
1.1. Распространенная схема систем вентиляции.....	3
2. Структура объекта и его динамическая модель	8
3. Моделирование переходных процессов в среде CoDeSys	15
3.1 Реализация системы управления в среде CoDeSys	17
4. Реализация системы управления	28
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
6. Социальная ответственность	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
Приложение А.....	

ВВЕДЕНИЕ

1. Введение в проблему и постановка задачи

Вентиляторы по праву считаются сердцем любой системы вентиляции (СВ). Именно они заботятся о том, чтобы кондиционируемые помещения получали запроектированный для них расход свежего воздуха. Вентиляторы при этом выполняют две важнейшие задачи:

- компенсация потерь давлений, возникающих при распространении воздуха в системе;
- подача необходимых объемных расходов воздуха.

Под системой вентиляции производственных помещений понимают систему технических средств, предназначенных для обеспечения на постоянных рабочих местах, в рабочей и обслуживаемой зонах помещений тепловоздушного режима, соответствующего гигиеническим и техническим требованиям [1].

1.1. Распространенная схема систем вентиляции

В качестве исследуемого объекта управления рассмотрим замкнутый контур управления температурой в системе вентиляции (рис. 1), где исполнительным элементом является асинхронный двигатель (АД) с преобразователем частоты (ПЧ). Обычно температуру поступающего воздуха регулируют посредством управляемого клапана, через который поступает теплоноситель, нагревающий воздух в теплообменнике. Основная проблема заключается в том, что при очень низких температурах теплоноситель, который подается на калорифер, недостаточно обеспечивает температуру воздуха, собственно сам калорифер стоит очень дорого. Раньше подмешивали часть воздуха изнутри с внутренним воздухом, то есть регулировали с подмесом. В старых системах имелся второй контур поддержания температуры при условии, что первый исчерпал себя, то есть в случае если откроем теплоноситель полностью, мы больше не можем поднять

температуру. Причиной превышения температуры обратного теплоносителя является некачественный расчет калорифера, параметры которого не позволяют обеспечивать теплообмен при заданном объеме нагреваемого воздуха. В этом случае автоматическая система поддерживает заданное значение температуры обратного теплоносителя, при этом температура приточного воздуха может значительно снижаться. Удерживать температуру в заданном коридоре можно снизив объем воздуха. Также управлением потоком воздуха можно решить вторую проблему, связанную с режимами, когда температура обратного теплоносителя снижается ниже точки замерзания. Для решения задачи управления объемом воздуха предлагается разделить по задающей температуре работу клапана и вентилятора, так, чтобы задающее значение второго контура преобразователя частоты вентилятора был на 1-2 градуса ниже, чем значение для первого контура управления клапаном калорифера. В этом случае второй контур при снижении температуры подающего воздуха более чем на 2 градуса от заданного значения обеспечит постепенное уменьшение скорости вентилятора до оптимального данному режиму объема воздуха. При условии соблюдения заданной температуры подающего воздуха второй контур обеспечит увеличение потока воздуха для заданных пределов. На сегодняшний день в новых системах управления контур подмеса стоит дороже, чем частотный привод двигателя в вентиляторе. Теперь мы можем управлять потоком воздуха, уменьшая или увеличивая скорость. Задача управления температурой с помощью ПЧ-АД возникает в исключительных случаях при очень низких температурах на улице, когда поступающего теплоносителя через полностью открытый клапан недостаточно и, именно в этом случае, заданная температура обеспечивается понижением объема нагреваемого воздуха. В руководствах к реализации подобных систем известных авторам контур управления температурой средствами ПЧ АД, как правило, недостаточно качественно описан. Это связано с тем, что этот режим управления возникает достаточно редко и система не может быть

настроена во время выполнения работ по отладке и вводу ее в эксплуатацию. Для настройки требуется ждать появления внешних условий, приводящих к такому режиму управления, при этом часто сам объект управления эксплуатируется в труднодоступных местах.

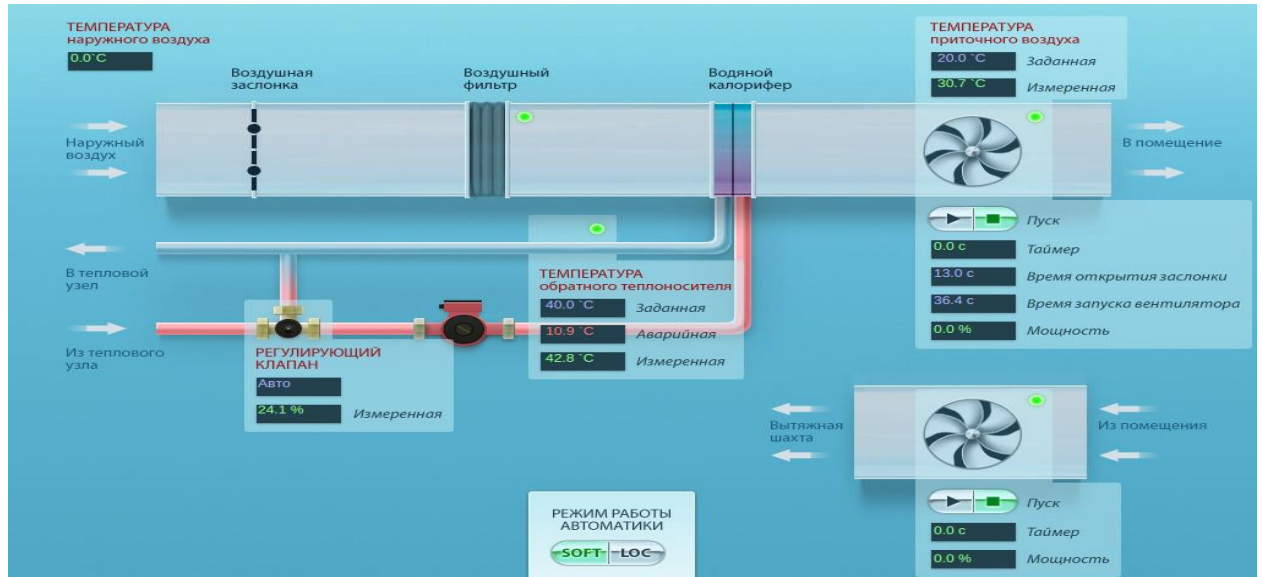


Рисунок 1 – Системы вентиляции (система с частотным управлением)

В этой связи, задача организации экспериментальных работ на объекте и его настройка средствами дистанционного управления актуальна и ее решение может быть привлекательно для специалистов в области автоматизации управления.

Современная автоматизированная система управления (АСУ) представляет собой многоуровневую систему управления. Создание АСУ осуществляется с использованием автоматических информационных систем сбора данных и вычислительных комплексов, которые постоянно совершенствуются по мере эволюции технических средств и программного обеспечения. Автоматическая система призвана упростить труд жителя нашей планеты, расширить его многофункциональные способности либо поменять стопроцентно, ежели данное может быть. Потому зодчество систем автоматизации почти во всем припоминает постройка жителя нашей планеты: роль органов эмоций делают измерители, роль рук, ног и органов речи - исправные приспособления, роль мозга - компьютер или контроллер.

Задачами системы автоматизации могут быть различны, в зависимости от поставленной задачей, например:

- мониторинг (длительные измерения и контроль с архивированием приобретенной информации);
- автоматическое управление (в системе с обратной связью или без нее);
- диспетчерское управление (управление с помощью человека-диспетчера, который взаимодействует с системой через человеко-машинный интерфейс);
- обеспечение безопасности.

В автоматизированных системах вместо компьютера или одновременно с ним часто используют программируемый логический контроллер (ПЛК). Типовыми отличиями ПЛК от компьютера является специальное конструктивное исполнение. Контроллеры имеют также малые размеры, расширенный температурный диапазон, повышенную стойкость к вибрации и электромагнитным излучениям, низкое электропотребление, защищены от воздействия пыли и воды, содержат сторожевой таймер и платы аналогового и дискретного ввода-вывода, имеют увеличенное кол-во коммутационных портов. В контроллерах в отличие от компьютеров, как правило, используется операционная система реального времени. Недостаточно глубокие знания регулируемого процесса не позволяют правильно выбрать параметры регулятора. Поэтому стоит уделить этому особое внимание. Таким образом, чтобы понять динамическую модель и правильно настроить контур регулирования температуры предлагается использовать частотный привод, исследовать нелинейные свойства замкнутой системы, чтобы позволить этой системе быстро реагировать на поддержание температуры. К тому же эта задача во многих скриптах не решена. Также, частотное управление обеспечивает плавный пуск вентилятора, что позволяет исключить помехи в системе вентиляции, тем самым делая систему более надежной. Для реализации предложенной системы управления необходимо

выполнить синтез математической модели, определить влияние на модель и структуру отличия от традиционных моделей. Провести численное моделирование и анализ результатов. Для того, чтобы получить динамическую модель требуется исследования качественной математической модели, переходных процессов предложенной системы.

2. Структура объекта и его динамическая модель

Динамическая модель системы управления за счет частотного привода можно построить, используя методологию, представленную в статье [10]. При создании современных тепловых систем для зданий и сооружений предполагается наличие в структуре теплового узла управляемого клапана с автоматическим регулятором и погодной компенсацией [11, 12, 13].

В этом разделе рассмотрим, каким образом можно организовать настройку системы. В общей теории автоматического управления структура регулятора выбирается исходя из модели объекта управления. При этом более сложным объектам управления соответствуют более сложные регуляторы. Широко распространенным подходом для синтеза параметров регулятора, например, ПИД – регуляторов, является использование экспериментальных данных, кривую разгона процесса [14].

В литературе принято ПИД – закон записывать в форме (1; 2):

$$W_p(s) = \kappa_p \frac{T_u + T_\partial}{T_u} + \frac{\kappa_p}{T_u s} + \kappa_p T_\partial s, \quad (1)$$

где

$$K_\Pi = \kappa_p \cdot \frac{T_u + T_\partial}{T_u}; \quad K_i = \frac{\kappa_p}{T_u}; \quad K_\partial = \kappa_p \cdot T_\partial; \quad (2)$$

κ_p – передаточный коэффициент регулятора, T_u – постоянная времени интегрирования, T_∂ – постоянная времени дифференцирования.

Пропорционально интегрально дифференциальный закон (ПИД – закон) формирует управляющие воздействия с учетом и скорости изменения ошибки [23].

ПИД-регулятор имеет три составляющих (рисунок 2):

- Пропорциональная составляющая;
- Интегрирующая составляющая;
- Дифференцирующая составляющая.

Пропорциональная составляющая работает в момент появления рассогласования и отвечает за реакцию на мгновенную ошибку регулирования.

Интегрирующая составляющая используется для устранения статической ошибки, что позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку, также добиться максимальной скорости достижения уставки при отсутствии перерегулирования.

Дифференцирующая составляющая зависит от скорости изменения параметра вызывающей реакцию регулятора на резкое изменение измеряемого параметра, возникшее, к примеру, в результате внешнего возмущающего воздействия.

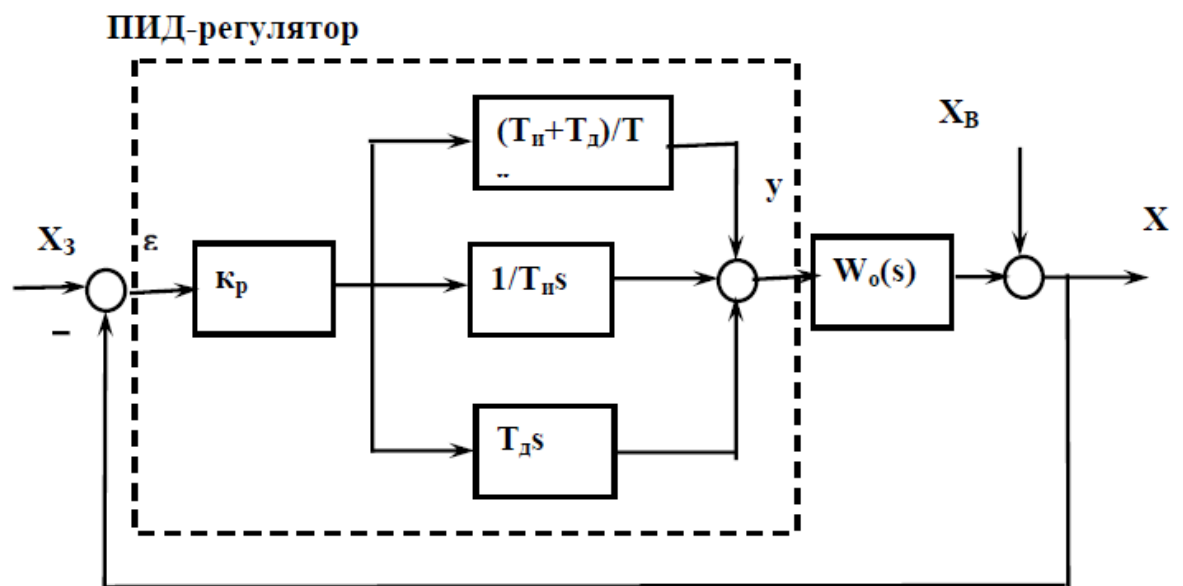


Рисунок 2 – ПИД-регулятор

Основной принцип определения коэффициентов ПИД – регулятора состоит в том, чтобы определить переходную функцию объекта. Далее по переходной функции по эмпирическим формулам определяются коэффициенты регулятора. После расчета параметров регулятора обычно требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования. Для этого используется ряд правил, хорошо обоснованных теоретически:

- Увеличение пропорционального коэффициента увеличивает

быстродействие и снижает запас устойчивости;

- С уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- Уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- Увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

В ПИД-регуляторе присутствует сложность фактического внедрения. Это затрагивается, черт объекта управления, собственно часто приводит неквалифицированного специалиста к неверной настройке ПИД-регулятора. Потому, для корректной опции объекта регулировки, ценности коэффициентов ПИД-регулятора нужно подыскивать.

По переходному процессу можно определить передаточную характеристику. Если есть передаточная характеристика, мы имеем как минимум два метода настройки ПИД – регулятора. В зависимости от типа и порядка объектов, а также соотношений между их постоянными времени, настройка контура регулирования осуществляется либо по критерию модульного оптимума (МО), либо по критерию симметричного оптимума (СО). Настраиваемые параметры регуляторов K_p , T_u , T_d , обеспечивающие получение определенных показателей качества, будем называть гарантирующими [26]. Системы вентиляции в принципе динамические и они описываются в самом простом линеаризованном виде, в виде передаточной функции 2-го или 3-го порядка. Если у объекта

$$\frac{k_0}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)(T_{03}p + 1)}$$

$$(T_{01} < T_{02} < T_{03})$$

(3)

$$T_{03} \leq 4T_{01}$$

то предпочтителен критерий МО (табл. 1). Для выполнения требований критерия применяют ПИД –регулятор.

Таблица 1 – Настройка контура регулирования по критерию

Передаточная функция объекта $W_o(p)$	Условия примене- ния	Крите- рий	Параметры регулятора		
			K_p	T_u	T_d
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02})$	$T_{02} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{02}}{2k_0T_{01}}$	T_{02}	–
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	–
$\frac{k_0}{p(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)}$	$T_{02} < T_{01}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	–
	$T_{01} < T_{02}$	СО	$\frac{1}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
$\frac{k_0}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)(T_{03}p+1)}$ $(T_{01} < T_{02} < T_{03})$	$T_{03} \leq 4T_{01}$	МО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	T_{03}	T_{02}
	$T_{03} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{03}}{2k_0T_{01}}$	$4T_{01}$	T_{02}
	$T_{02} \geq 4T_{01}$	СО	$\frac{T_{02}T_{03}}{8k_0T_{01}^2}$	T_{02}	$4T_{03}$

«Выводы о влиянии критериев настройки и параметров регулятора на показатели переходного процесса:

1. Увеличение передаточного коэффициента K_p приводит к уменьшению перерегулирования σ .
2. Увеличение постоянной интегрирования T_u приводит к увеличению времени переходного процесса и снижению перерегулирования.

3. Критерий МО предпочтителен при оптимизации систем, отрабатывающих в основном задающее воздействие.
4. Критерий СО целесообразно применять при настройке стабилизирующих систем, отрабатывающих в основном возмущающее воздействие» [22].

При применении ПИД-регулятора для данной системы возникают несколько проблем связанные со спецификой применения частотного преобразователя и ограничений на скорость изменения перепада давления в контурах пластинчатого теплообменника. Существует ограничение на скорость изменения частоты $f_{рл}$ изменения вектора потокосцепления, которые зависят от нагрузки на вал двигателя и других условий.

ПИД составляющая регулятора дает возможность мгновенно изменять управляющее напряжение $u_{зд}$, которое поступает на ПЧ. Наличие запаздывания в объекте управления в значительной степени влияет на устойчивость замкнутой системы в сторону снижения запаса устойчивости. Для компенсации влияния запаздывания и повышения точности регулирования применяют регуляторы, приближающиеся по своим свойствам к так называемым идеальным регуляторам для объектов с запаздыванием. Одним из таких идеальных регуляторов является регулятор Ресквики, имеющий при отсутствии помех на входе системы передаточную функцию (4):

$$W_{pu}(s) = \frac{1}{1 - e^{-s\tau_0}} \cdot \frac{1}{W_o'(s)}, \quad (4)$$

где τ_0 – полное запаздывание, $W_o(s)$ – передаточная функция инерционной части объекта управления, имеющего общую передаточную функцию (5)

$$W_o(s) = W_o'(s)e^{-s\tau_0}. \quad (5)$$

На практике наиболее часто инерционные статические объекты имеют переходные характеристики $h(t)$ S-образной формы. S-образную переходную

характеристику, снятую экспериментальным путем, можно охарактеризовать параметрами, определяемыми непосредственно по графику: K_0 – коэффициент передачи, постоянной времени T_0 и полным запаздыванием τ_0 , которое равно сумме чистого запаздывания τ_1 и переходного запаздывания τ_2 . Сняв кривую разгона и оценив характер объекта управления, можно определить параметры соответствующей передаточной функции. Перед началом обработки кривую разгона рекомендуется пронормировать (диапазон изменения нормированной кривой 0 – 1) и выделить из ее начального участка величину чистого временного запаздывания. Параметры T_0 и τ_0 определяют проведением касательной к наиболее крутому участку переходной характеристики (рис. 3).

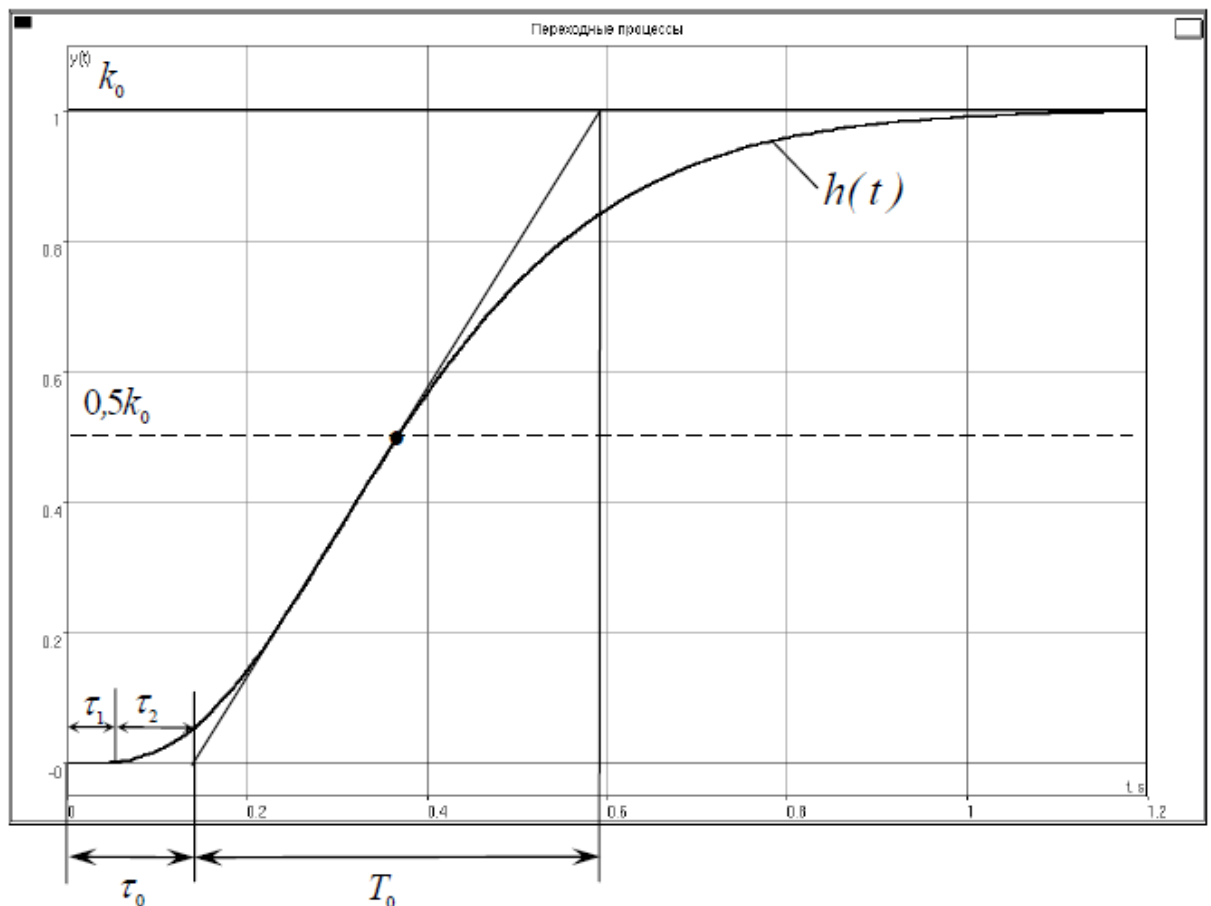


Рисунок 3 – Определение динамической характеристики объекта по кривой его разгона

Модель имеет отрицательный коэффициент передачи по управлению, т.к. процесс получения модели второго порядка ничем не отличается, за

исключением вида нелинейной зависимости коэффициента смещения, который теперь имеет обратную монотонную функцию зависимости от частоты вращения по управлению (6). Причина отрицательного коэффициента в том, что с повышением объема воздуха температура падает.

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{T_o} \cdot (g_{sm}(f_{pl})k_u(x,t) \cdot u_{3d}(t-\tau) - x_1) \quad (6)$$

где τ – эквивалентное запаздывание элементов с малым временем инерции, с малым временем инерции, T_o – время инерции. Коэффициент k_u имеет сложную зависимость от параметров все системы [6]. Коэффициент передачи g_{sm} имеет отрицательное значение $g_{sm} < 0$. Следует учитывать этот факт в реализации системы управления.

После того, как выяснили параметры определения динамической характеристики объекта управления, опираясь на научные материалы, нам остается получить переходный процесс.

3. Моделирование переходных процессов в среде CoDeSys

С появлением современных автоматизированных систем управления технологическими процессами АСУ ТП, реализованных на программируемых логических контроллерах (ПЛК), для специалистов стали доступны удобные инструменты, позволяющие значительно упростить процесс настройки динамических параметров замкнутых систем. Возможности использования ПЛК позволяют создавать технические решения, позволяющие не только эффективно организовать процесс настройки, но и выполнять научные исследования на удаленных действующих объектах управления. Проблема реализации задач контроля и настройки удаленных объектов управления весьма актуальна и ее решения достаточно хорошо представлены в научной литературе. В работе [3] предлагается использование встроенного *web*-сервера в рамках достаточно мощных ПЛК, где используется *CGI* технология передачи данных в *XML* формате. При этом возможно реализовать доступный *web*-интерфейс отображения данных и управление удаленным объектом, однако для использования данной технологии требуются знания в области верстки *web*-страниц и *CGI* технологии программирования серверов. Подобная задача удаленного контроля рассматривается в [4], где задачи, требующие точности измерения в реальном времени, решена с помощью использования программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Такой подход требует глубоких знаний в области схемотехники. Еще одно техническое решение [5] использует непосредственное программирование микропроцессора, такая реализация подобных систем доступна системным программистам.

Для таких систем имеется возможность использовать готовые библиотеки производителей ПЛК [6], где уже включают в себя основные законы управления динамическими объектами и процедуры самонастройки замкнутых контуров.

В данной работе предложено решение, доступное специалистам

знакомым со *CoDeSys* – средой программирования ПЛК на технологических языках программирования, которые более доступны и понятны специалистам в области автоматизированных систем управления [27].

CoDeSys – это современный инструмент для программирования контроллеров, а так же зарекомендовавшая себя программа, которая используется больше чем на 700 плк [7]. В данной программе доступно 5 языков программирования это IL, ST, FBD, SFC и LD. Для моделирования переходных процессов воспользуемся языком функциональных блоков т.е. FBD.

Процедура настройки контура связана с выполнением эксперимента на объекте управления с целью оценки динамических свойств объекта.

Для описания процесса воспользуемся дифференциальными уравнениями [10]:

$$\begin{aligned}\frac{dh}{dt} &= \frac{u(t)}{\tau_h}; \\ \frac{dT_{bat}}{dt} &= \frac{(T_1 - T_{обр}) \cdot (1 - e^{k_h h}) k_{max}}{\tau_{см}}; \\ \frac{dT_{из}}{dt} &= \frac{(T_{bat} - T_{из})}{\tau_{из}}; \\ \frac{dT_{д}}{dt} &= \frac{(T_{из} - T_{д})}{\tau_{д}},\end{aligned}\tag{7}$$

Используя дифференциальные уравнения (7) составим FBD программу в среде CoDeSys. В программе есть собственная библиотека, которая непосредственно используется для построений.

3.1 Реализация системы управления в среде CoDeSys

Создаем новый проект, для этого в меню *File* даем команду *New*. В появившемся диалоге выбора целевой платформы (тип ПЛК) *Target Settings* выбираем *None*. Это означает, что мы будем пока работать со встроенным эмулятором CoDeSys. Нажимаем кнопку *OK*. В следующем диалоге свойств нового программного компонента МЭК задаем тип POU: *Program*, имя нового компонента *PLC_PRG*. В качестве языка программирования нового компонента выбираем *FBD* (рис. 4) и нажимаем *OK* [18].

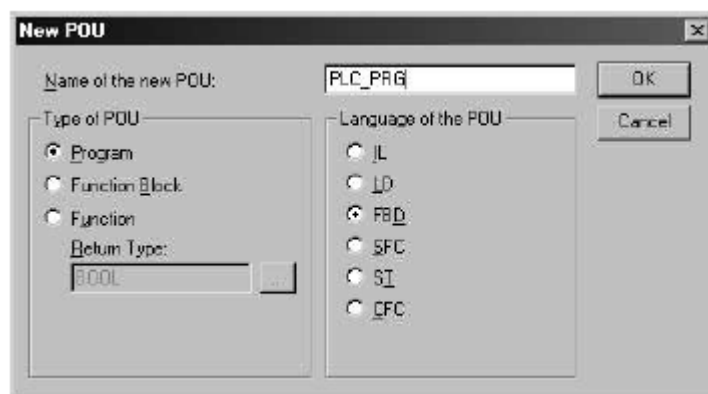


Рисунок 4 – Диалог создания нового программного компонента

Обратите внимание на раздел объявлений. Ключевые слова выделены здесь ярким синим цветом (рис.5). Если написать вместо *PROGRAM* слово *PROGRA*, то окраска данного слова изменится на черный цвет. Так работает синтаксическое выделение. Оно позволяет замечать и исправлять синтаксические ошибки до компиляции программы.

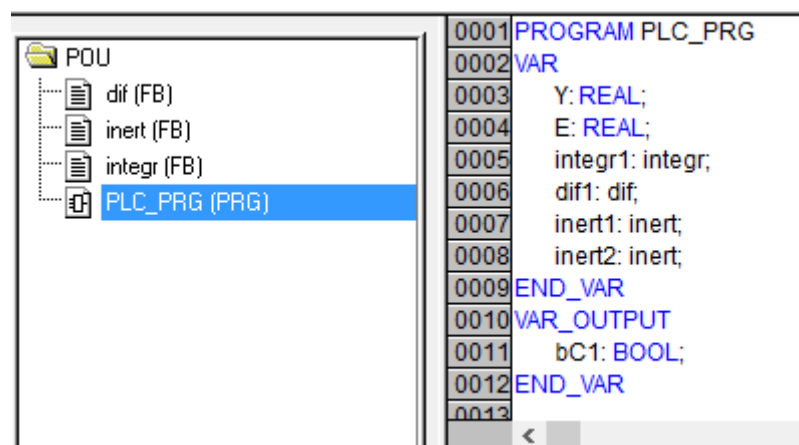


Рисунок 5 – Диалог создания нового программного компонента

В рабочем окне CoDeSys мы увидим окно редактора языка *FBD*. Оно разделено на 2 части. Верхняя часть – это раздел объявлений. Нижний раздел – это собственно раздел реализации. И здесь мы реализуем, то есть пишем текст нашей программы (рис. 6,7,8).

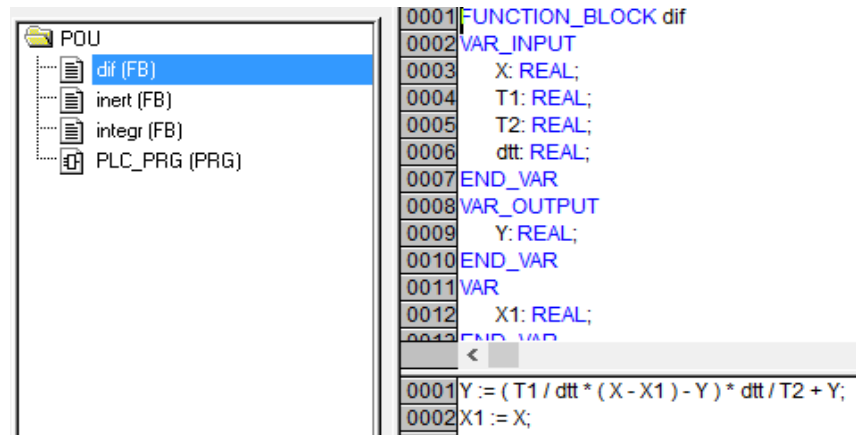


Рисунок 6 – Дифференциальное составляющее звено

Уравнение дифференциального составляющего звена (8):

$$W(p) = \frac{y}{x} = \frac{T_1 \cdot s}{1 + T_2 \cdot s}$$

$$y + T_2 \cdot s \cdot y = T_1 \cdot s \cdot x \quad (4)$$

$$y + T_2 \cdot \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} = T_1 \cdot \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

$$y = \left(\frac{T_1}{\Delta t} \cdot (x - x_1) - y \right) \cdot \frac{\Delta t}{T_2} + y$$

(8)

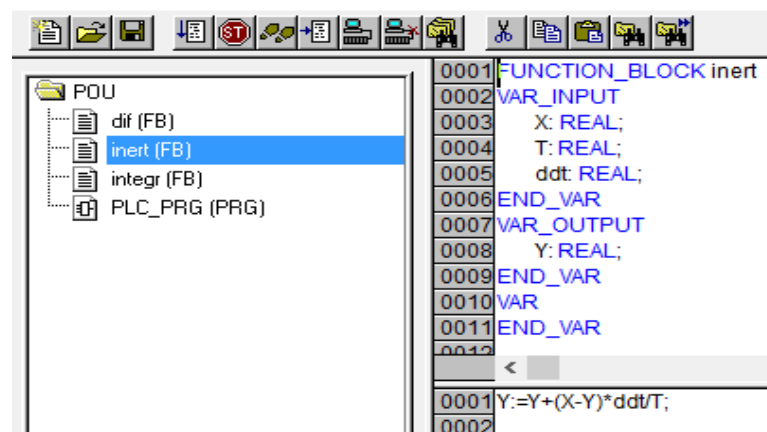


Рисунок 7 – Инерционное составляющее звено

Линейная математическая модель объекта второго порядка в виде передаточной функции, представленная в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев первого порядка с передаточной функцией.

$$W_{ob}(s) = \frac{k_{ob}}{(1 + T_{ob1}s)(1 + T_{ob2}s)}, T_{ob2} \leq T_{ob1}$$

$$W(p) = \frac{1}{1 + T \cdot s} = \frac{y}{x}$$

$$x = y + T \cdot s \cdot y$$

$$x = y(t) + \frac{dy(t)}{dt} \cdot T$$

$$x(t) = y(t) + T \cdot \frac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t}$$

$$y(t+\Delta t) = \frac{x(t) - y(t)}{T} \cdot \Delta t + y(t)$$

$$y = (x - y) \cdot \frac{\Delta t}{T} + y$$

(9)

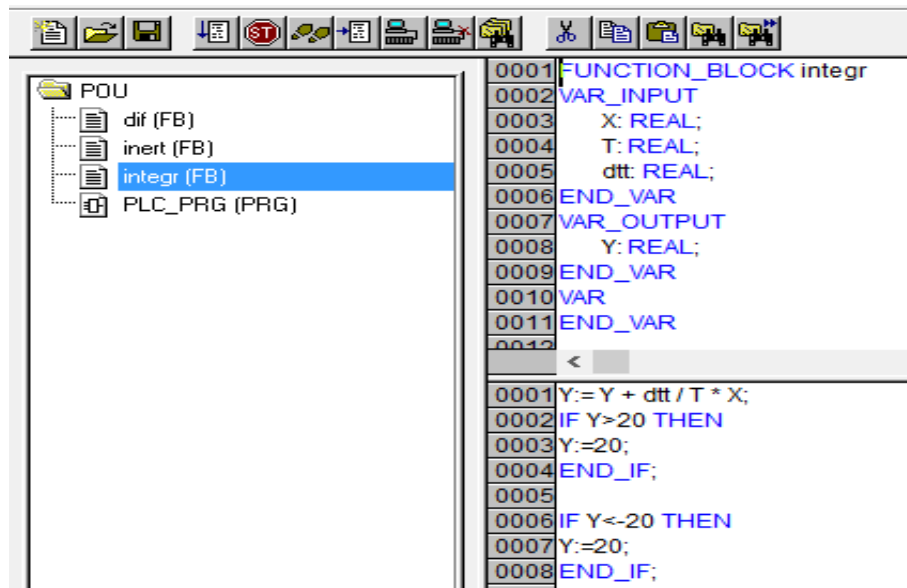


Рисунок 8 – Интегральное составляющее звено

Уравнение интегрального составляющего звена (10):

$$W(p) = \frac{y}{x} = \frac{1}{T \cdot s}$$

$$y = y + \frac{\Delta t}{T} \cdot x$$

(10)

Для полной проверки необходимо выполнить компиляцию проекта, для этого как на рисунке 9 выполняем команду *Проект – Компилировать все*.

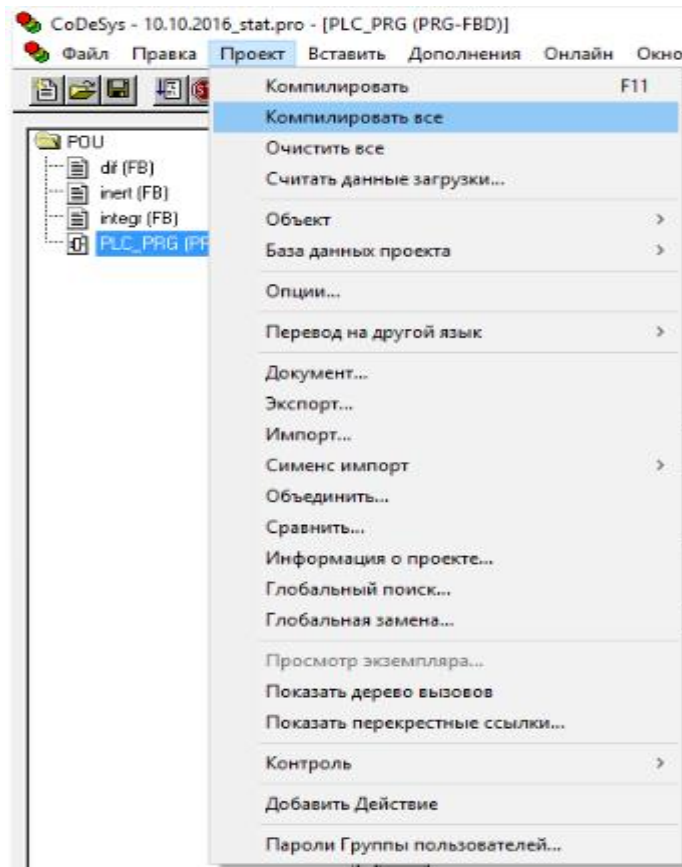


Рисунок 9 – Компиляция проекта

Не нужно пытаться написать всю программу целиком и затем откомпилировать. Компилируйте проект после написания каждого более или менее целостного фрагмента. Ошибки лучше исправлять сразу. Ведь мы можем забыть все тонкости задуманных конструкций: правильные имена переменных, соответствие открывающих и закрывающих скобок в выражениях.

CoDeSys выводит результаты компиляции в специальном окне сообщений, расположенном в нижней части рабочего экрана (рис.10).

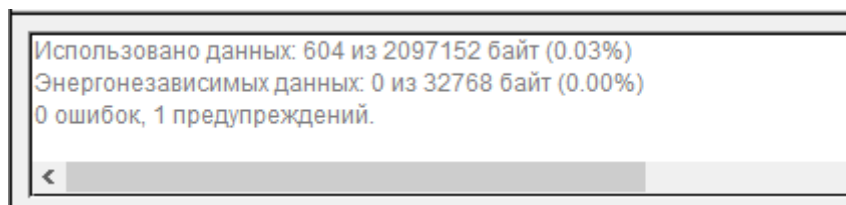


Рисунок 10 – Результат компиляции

Лучшим результатом является *0 Erros(s) (ошибок)*. Если показывает, что есть ошибки, то нужно перейти в окно сообщений и найти самое первое сообщение об ошибке. Щелчок мышки или нажатие кнопки *Enter* на тексте сообщения приведет к установке курсора на место в тексте вызвавшее проблему. Сообщения об ошибках всегда нужно анализировать и исправлять, начиная с первого. Очень часто одна опечатка может привести к нарушению ряда условий и вызвать целый букет сообщений [18].

После FBD программы следует учесть, что в режиме стоп система исполнения CoDeSys опрашивает входы выходы контроллера и производит все обычные вспомогательные действия с единственным исключением – прикладная программа не выполняется. Не смотря на то, что в режиме стоп программа ничего не делает, это самый полезный режим при отладке. В режиме стоп все данные переменных «заморожены» и мы можем изучать их сколь угодно долго. С помощью отладчика CoDeSys мы всегда можем остановить программу. Для этого существует команда *Online Stop* и соответствующая иконка на панели управления. Остановка программы выполняется не мгновенно в отличие от точек останова, а по окончании рабочего цикла ПЛК. В ПЛК мы имеем возможность доступа к значениям входов и выходов ПЛК. Это дает возможность проверить монтаж оборудования. Так для изучения работы датчиков мы можем формировать внешние воздействия и наблюдать результат в числовом формате или в виде графиков (графическая трассировка).

Создав проект и загрузив отлаженное приложение, можно запустить его

на устройстве. Для этого нужно выполнить команду Start Application, которая по умолчанию находится в меню Online (рис.11). Затем щелчок правой кнопки мышки и выполняем команду *Начать трассировку – Автоматическое чтение* (рис.12). Программа начнет выполняться.

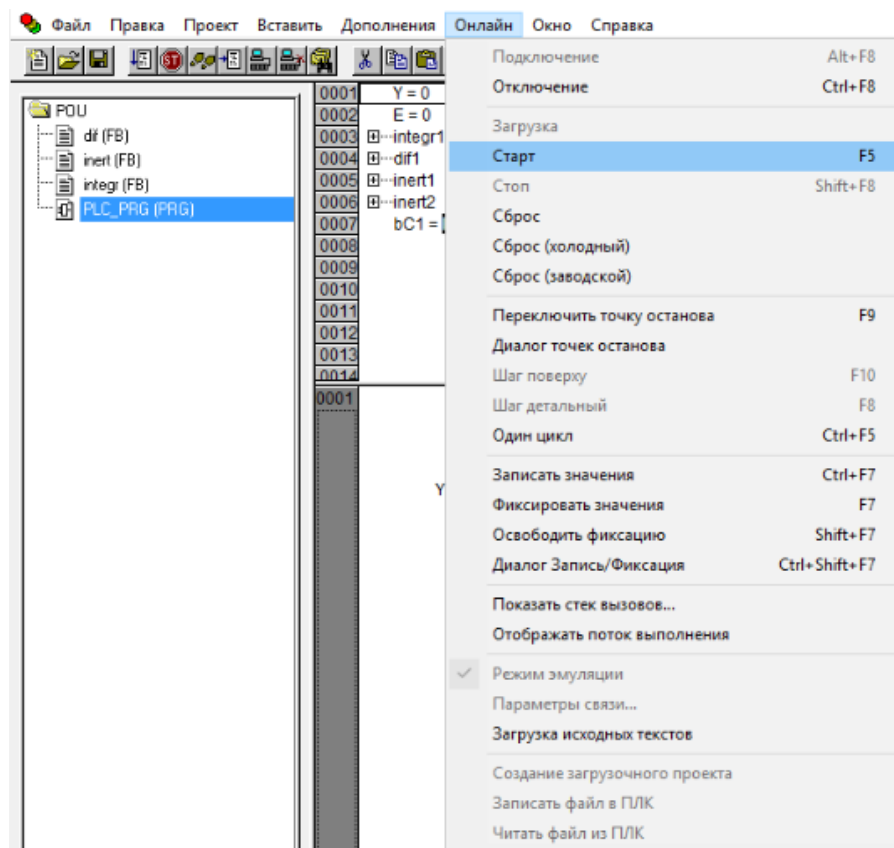


Рисунок 11 – Команда Start Application

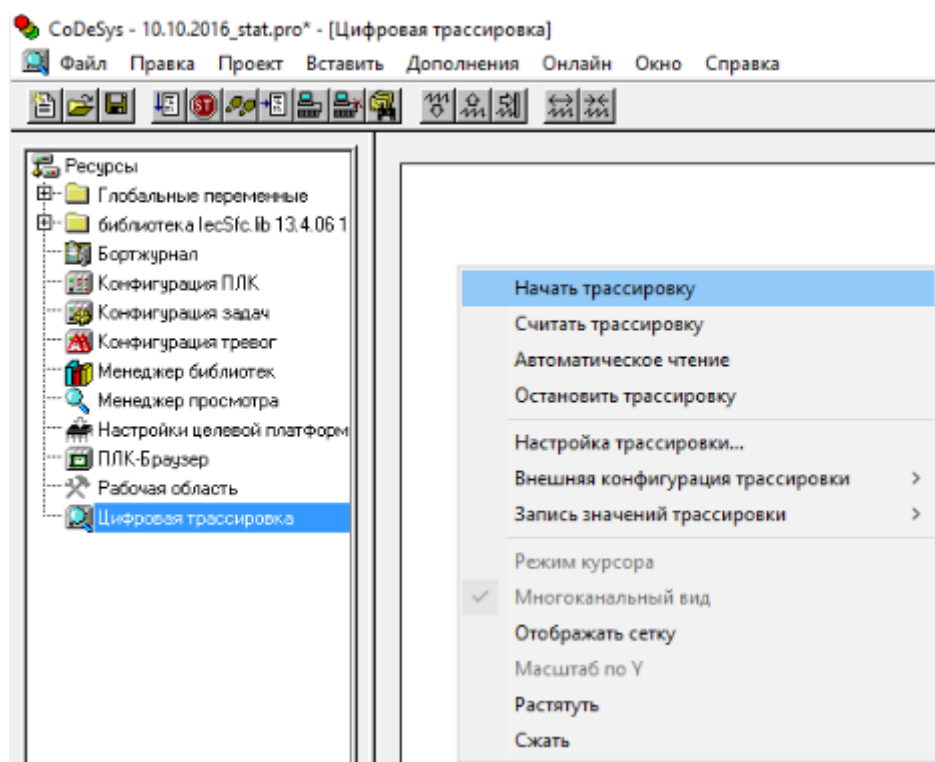


Рисунок 12 – Выполнение трассировки

«По умолчанию активирован онлайн режим, в котором мы и будем следить за значениями переменных. Команда Online/ Run запускает проект. Чтобы проверить работу программы нужно перейти в окно визуализации. Также в случае отсутствия контроллера можно проверить работу проекта в режиме эмуляции. Для этого требуется установить флажок в меню Online/Simulation. Далее перейти в режим Online, как описано выше» [27].

Проследить за значениями переменных можно с помощью “Трассировки”. Для этого нужно открыть четвертую вкладку в организаторе объектов в CoDeSys. Окно трассировки после настройки показано на рисунке 13.

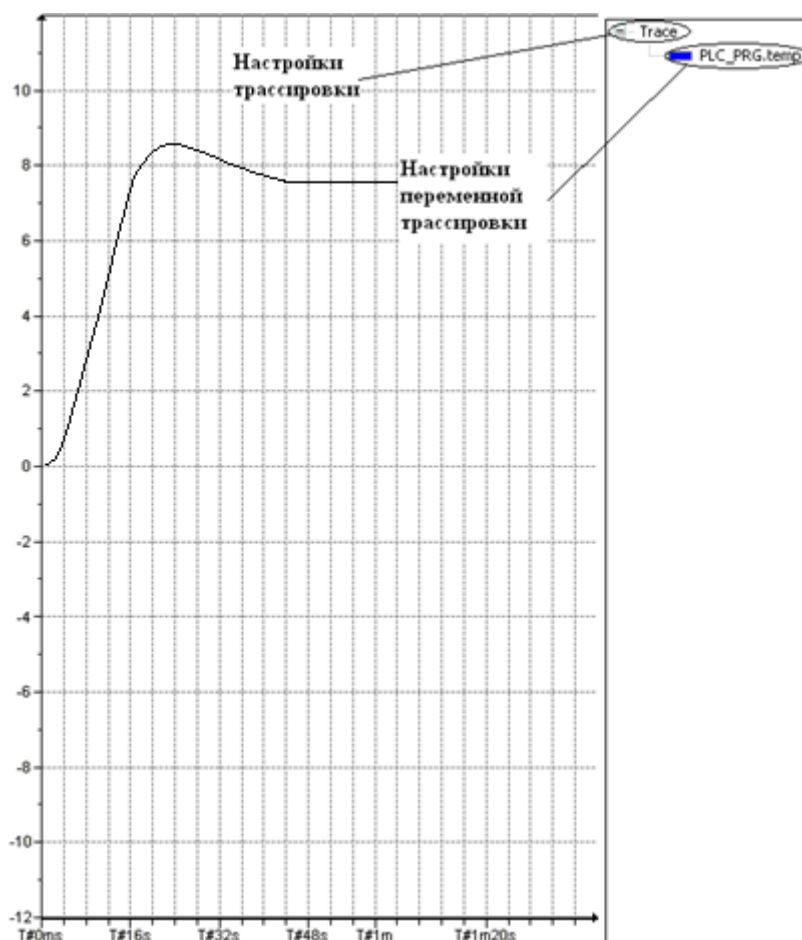


Рисунок 13 – Вид окна трассировки

«Данный инструмент подобен трендам SCADA-систем, но имеет существенное отличие. Данные трассировки CoDeSys аккумулируются в памяти контроллера. Это делается системой исполнения в реальном времени. Для отображения на компьютере данные передаются по его запросу асинхронно от записи. Это означает, что мы можем проводить детальнейшее отслеживание значений переменных по рабочим циклам, даже если контроллер очень быстрый, а канал связи медленный. То есть трассировка CoDeSys приемлема не только для анализа медленных технологических процессов, но и для анализа хода выполнения программы. Она применяется на этапе проектирования для изучения объектов и исследования функциональных зависимостей, при эксплуатации для технологических целей и исследования проблемных ситуаций. После запуска трассировки связь с компьютером иметь необязательно. Трассировка может работать

параллельно с программой, не влияя на нее. После “срабатывания” триггера данные хранятся в памяти контроллера до тех пор, пока не будут считаны. Минимум, что нужно сделать, – это задать переменные, значения которых нас интересуют»[27].

Мы можем ввести имя переменной в поле “Input of trace variable” вручную либо выбрать из списка с помощью ассистента ввода, нажав клавишу F2. По умолчанию, трассировка работает непрерывно в режиме самописца до команды остановки. Но можно фиксировать определенные события. Таким событием может служить изменение любой переменной, именуемой триггерной. Ее необходимо указать в поле “Trigger Variable”. Критический порог значения триггерной переменной задается “Trigger Level”. Флажки “positive”, “negative”, “both” задают остановку трассировки соответственно при росте, уменьшении или равенстве значения триггерной переменной уровню порога. Чтобы мы смогли проанализировать ситуацию не только до события, но и непосредственно после него, есть смысл останавливать трассировку с некоторой задержкой. Величину этой задержки в процентах от общего числа замеров мы можем задать в поле “Trigger position”.

Третья страничка организатора объектов CoDeSys называется визуализация. Она нужна для создания интерфейса и диспетчерского мониторинга проекта в режиме реального времени. Для этого следует перейти на вкладку визуализации. В контекстном меню ввести команду добавления объекта Add object. И присвоить новому объекту имя. В разделе визуализации можно наглядно представить проект, рисуя элементы визуализации с последующей настройкой. Так же в Визуализации можно проследить за значениями интересующих переменных, в блоке (элементе) Тренд. Не следует путать Трассировку с Визуализацией. Отличие блока визуализации в том, что это веб интерфейс (не все контроллеры имеют веб интерфейс). То есть, при открытии идет режим онлайн просмотра, текущего состояния переменных, этот блок, тренд собирает данные и строит график, а

цифровая трассировка (трейсер) собирает в контроллере информацию в архиве ПЛК и хранит ее, старые замещает новыми, при запуске трейсера происходит отслеживание переменных и последующая запись в контроллере. Блок визуализации является диспетчерским мониторингом в режиме реального времени. В трассировке же формируется график $X(t)$, $Y(t)$, ...переходных процессов с последующей записью в архив.

Обычно требуется получить переходную характеристику. Задачу организации выполнения эксперимента решается средствами программирования ПЛК, включив несколько дополнительных элементов функциональной логики как, показано на рисунке 14.

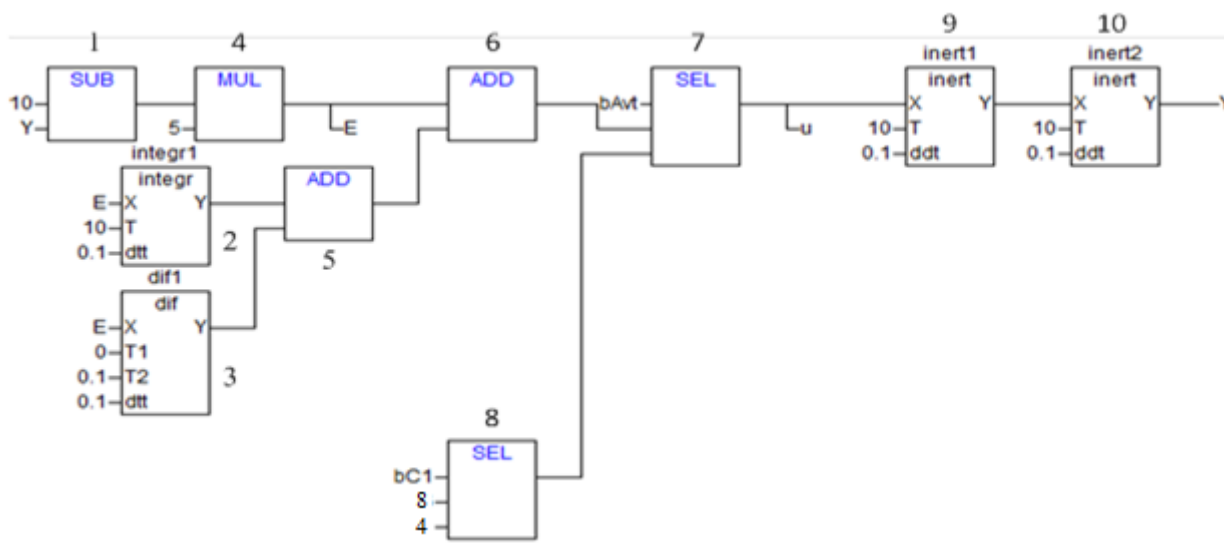


Рисунок 14 – Элементы *FBD* программы

Хочу отметить, что схема собрана для того чтобы показать как работает трейсер и как включать в действующую систему. Здесь управление формируется регулятором, обозначенным цифрами 1-6, реализован классически пропорционально интегрально дифференциальный (ПИД) регулятор. Но на время эксперимента нужно отключить управляющее воздействие от регулятора и поставить статическое значение ($U = 8V$) пока система установится, а потом переключаем на другое значение ($U = 4V$), и в результате получим переходный процесс.

Суть автоматического эксперимента заключается введением двух блоков. Блоки 7 и 8 предназначены для коммутации сигнала управления в

двух режимах:

1. режим автоматической работы при значении флага $bAvt=TRUE$
2. режим эксперимента:
 - режим формирования возрастающего переходного процесса при значениях флагов $bAvt=FALSE$ и $bCl=FALSE$;
 - режим формирования спадающего переходного процесса при значениях флагов $bAvt=FALSE$ и $bCl=TRUE$.

В этом разделе была предложена методология получения переходного процесса в автоматизированном режиме. Можно использовать на любом ПЛК, который поддерживается системой *CoDeSys*. Как нам известно, их в мире 500 типов. Среда программирования *CoDeSys* позволяет сохранять переходный процесс в автоматическом режиме без участия человека в виде ряда измерений до 500 точек и загрузить его в персональный компьютер в удаленном режиме средствами ПЛК. Полученного ряда значений достаточно для построения качественного переходного процесса.

4. Реализация системы управления

Предлагается рассмотреть процесс модификации действующего ПЛК на примере регулятора ВЭСТ. Для систем вентиляции создана программа структуры на FBD-блоках (рис. 15) в среде Akiar [16]. «Язык функциональных блоковых диаграмм (FBD) не что иное, как перенос идей языка релейно– контактной логики (LD) на другую элементную базу. Вместо реле используются функциональные блоки, по внешнему виду – микросхемы [24]. Алгоритм работы некоторого устройства, выраженный средствами этого языка, напоминает функциональную схему электронного устройства: элементы типа логическое «И», логическое «ИЛИ» и т.п., соединенные линиями. FBD обладает характерным для языков, переносящих идеи релейной логики преимуществом: легкостью начального изучения. Предоставляют достаточно естественную возможность работы с аналоговыми переменными и минимальные средства структуризации (новые функциональные блоки можно компоновать, используя уже существующие) Язык FBD значительно выигрывает перед другими технологическими языками в удобстве программирования и структурирования алгоритмов» [25].

Таблица 2 – Технические характеристики регулятора ВЭСТ

Наименование характеристики	Значение
Напряжение питания переменного тока частотой 50 Гц	От 187 до 242 В (номинальное напряжение 220 В)
Потребляемая мощность, ВА, не более	3
Диапазон контроля температуры, °С	От минус 50 до плюс 150
Абсолютная погрешность измерения температуры (без учета погрешности датчиков), °С	±1
Тип входных ДТС	Pt1000
Количество аналоговых входов	8
Количество дискретных входов	5
Количество симисторных выходов	6
Количество аналоговых выходов 0–10 В	2
Количество дискретных выходов с возможностью формирования ШИМ	2
Максимальный ток, коммутируемый симисторными выходами	0,4 А при напряжении 220 В 50 Гц ($\cos \varphi > 0,4$)
Тип интерфейса связи	RS-232, RS-485
Длина линии связи прибора с периферийными устройствами по интерфейсу RS-232, м, не более	15
Длина линии связи прибора с периферийными устройствами по интерфейсу RS-485, м, не более	1200

В настоящее время полная библиотека функциональных блоков программного комплекса «АКИАР» насчитывает 43 элемента. Ниже в таблице 3 приведены обозначения и выполняемые функции основных функциональных блоков, которые нашли применение различных алгоритмах управления.

Не представлены блоки, выполняющие узкоспециализированные функции, например, для работы с памятью («FLASH» - Flash память; «EPR» - энергонезависимая память) или для выполнения операций с битовыми переменными на «низком» уровне («LShft» - формирование четырехбайтовых чисел, и обратно «RShft»).

Таблица 3 – Библиотека функциональных блоков «АКИАР»

Обозначение	Функция
Ind	Блок задания параметра, отображаемого на индикаторе регулятора (без возможности настройки)
GetPar	Блок задания параметра, отображаемого на индикаторе регулятора (имеется возможность настройки)
SetCnst	Блок задания постоянного значения (вещественное число)
LoWord	Формирование двухбайтового числа (SHORT) на выходе блока из четырёхбайтового числа (LONG) на входе блока
HiWord	Функция, обратная "LoWord"
Integr	Блок интегрирования
Inert	Блок формирования инерционного звена с передаточной функцией $W(p)=1/(1+tp)$
Isodr	Блок формирования изотропного звена с передаточной функцией $W(p)=tp/(1+tp)$
USWOd	Блок формирования регулятора
Arch	Блок формирования архива значений переменной
Формирование сигнала на выходе (входе) блока	
SetDo	Цифровой выходной сигнал
SetAo	Аналоговый выходной сигнал
GetDi	Цифровой входной сигнал
GetAi	Аналоговый входной сигнал
Формирование на выходе блока реального значения текущего времени по формуле $Out=In/10$	
Hour	Часы
Mins	Минуты
DayM	День месяца
DayW	День недели
Year	Год
Блоки выполнения математических и логических операций	
Add (A+B)	Сложение
Mul (A×B)	Умножение
Sub (A-B)	Вычитание
Div (A/B)	Деление
More (A>B)	Больше
Equ (A=B)	Равно
Less (A<B)	Меньше
And (A&B)	Конъюнкция / "И"
Or (A B)	Дизъюнкция / "ИЛИ"
Xor (A/\B)	Исключающее "ИЛИ"
No (A→Ā)	Инверсия / "НЕ"
SI_AB	Выбор "A" при условии выполнения "U" (TRUE)

Среда Akiar позволяет создать библиотечный модуль, а именно блок pulse-width modulation (PWM) с помощью уже имеющегося кода от производителя. Этот блок будет управлять таймером процессора, обеспечивая нужную частоту и амплитуду сигнала, заданного ему скалярного закона $U/f=\text{const}$.

- передача информации о результатах выполнения в ЭВМ;

Автоматические системы вентиляции широко распространены в современных зданиях и сооружениях, где основным показателем качества работы является температура приточного воздуха [19]. Однако для систем, где применен водяной калорифер, существуют ограничение на температуру обратного теплоносителя связанное с требованием теплосети. Также возможны режимы работы системы при очень низкой температуре нагреваемого воздуха, когда мощности калорифера недостаточно для обеспечения основного показателя качества.

На рисунке 15 еще представлены динамические параметры, и реализован релейный регулятор в среде FBD-программирования Akiar [20]. Управление трехпозиционным клапаном (в контуре вентиляции) производится одинаковым широтно-импульсным способом, но по независимым друг от друга пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законам регулирования [21].

Измеряемые и заданные параметры представлены на рисунке 16. Для формирования управляющих сигналов задается параметр "Заданная температура приточного воздуха". С помощью датчиков температуры измеряется температура обратного теплоносителя и приточного воздуха. В этом режиме обеспечивается управление положением клапана для поддержания приточного воздуха, при этом не допускается допускать высокую температуру обратного теплоносителя, а значит, в хороших условиях постепенно увеличивается подача объема воздуха, но до определенного заданного значения (рис. 17).

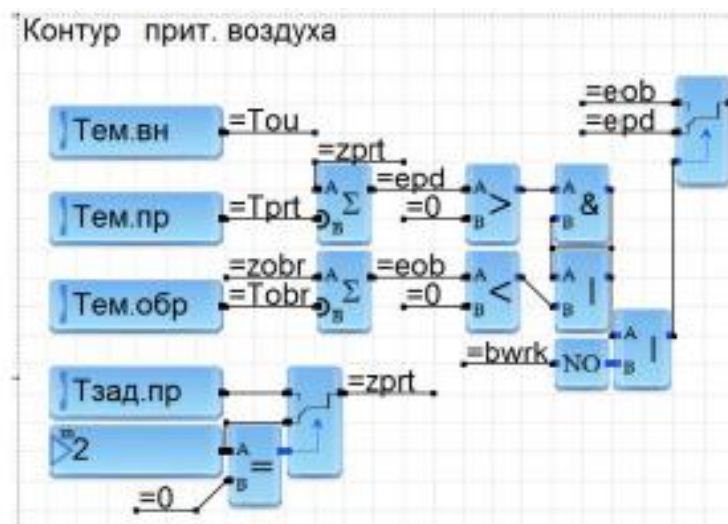


Рисунок 16 – Параметры управления клапана

В случаях, когда заданная температура приточного воздуха не поддерживается, то выполняется условие регулирование скорости вентилятора, т.е. медленное уменьшение подачи объема воздуха. Система проходит этап стабилизации показателей регулирования, это выдерживание температуры обратного теплоносителя и уменьшение потока воздуха для обеспечения температуры приточного воздуха.

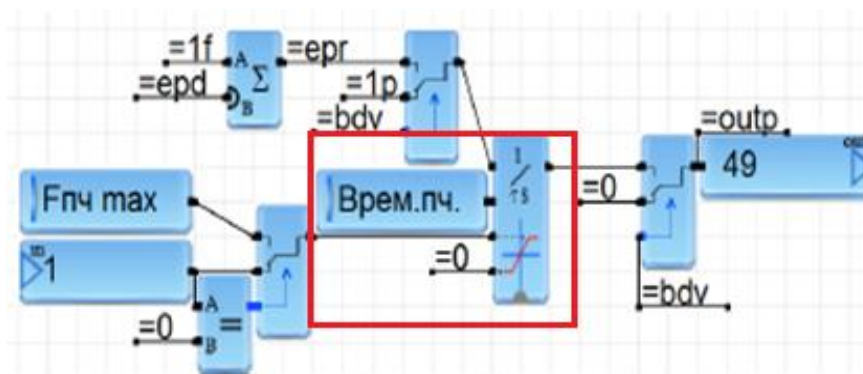


Рисунок 17 – Регулирование скорости вентилятора

Для ограничения максимальной скорости задается параметр, кроме того, задается постоянная времени изменения скорости оборотов вращения вентилятора. Целью этого является, поддержание температуры приточного воздуха на 1°C ниже заданной. Система способна восстановить оптимальный объем воздуха при смягчении погодных условий. Здесь регулирование

скорости вентилятора реализовано на И – регуляторе (рис. 18), собственно, в котором присутствуют значительные колебания связанные с управляющим сигналом и в связи с этим не справляется с задачей, так как он не качественный и работает очень медленно. Недостаток этого регулятора ухудшение динамических свойств в переходных режимах. Как нам известно, в теории автоматического управления [22], для того, чтобы настроить динамику переходных процессов, который удовлетворяющий передаточную функцию, для улучшения качества регулирования и так как у нас объект динамический, мы используем ПИД – регулятор (рис. 18).

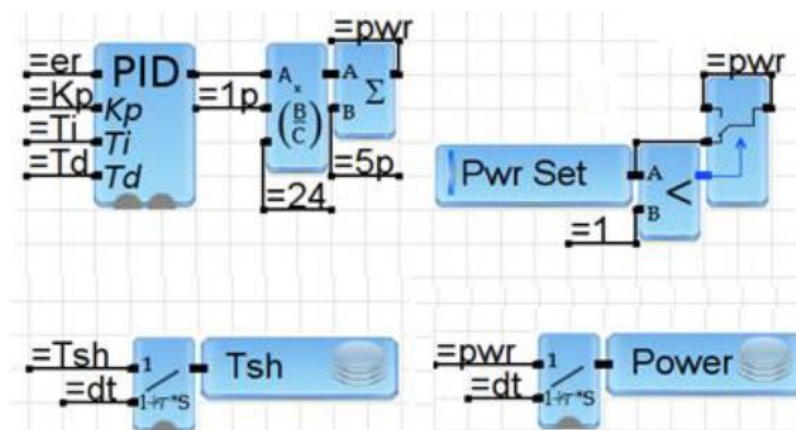


Рисунок 18 – Пропорционально интегрально дифференциальный регулятор

Этот разработанный фрагмент FBD логики, включенный в программу, в дальнейшем должен обеспечивать лучшие показатели качества переходного процесса. Фрагмент включает в себя: ПИД – регулятор и элемент FBD программы $Pwr Set$ (рис. 18), который предназначен для коммутации сигнала управления и создания переходного процесса. В свою очередь $Pwr Set$ работает в режимах:

- $=1$ – режим формирования возрастающего переходного процесса
- $=0$ – режим управления системы регулирования, где сигнал управления объекта является выходом регулятора, то есть если значение меньше 1, то автомат сработает (включится) и данное поступит на выход, а если больше 1, то значение не попадет на выход, а остается в $Pwr Set$. Чтоб вернуть схему в исходное положение достаточно записать значение

«0». Так же имеются блоки, в которых находится трейсер, записывающий температуру и мощность объекта управления.

Чтобы получить переходный процесс, приехал на объект посмотрел текущую мощность, которую вычислил ПИД – регулятор, выставил Pwt Set именно такой мощности и наблюдал минут 40-45. После того, как процессы восстановились, сбросил трейсер по мануалу этого регулятора, то есть поднял до 15 и опустил до 1, и каждые 2 секунды записывались значения (таб. 5). Настройка временного интервала архивирования данных в памяти регулятора производится путем изменения значения параметра «дискрет» (таб. 4).

Таблица 4 – Значения соответствия параметров настройки «дискрет»

Значение параметра «Дискрет»	Время дискретизации	Комментарий
0	2 сек	1024 записи по 2 секунды до полного заполнения архива
1	4 сек	1024 записи по 4 секунды до полного заполнения архива
2	8 сек	1024 записи по 8 секунды до полного заполнения архива
3	16 сек	1024 записи по 16 секунды до полного заполнения архива
4	32 сек	1024 записи по 32 секунды до полного заполнения архива
5	1 мин	1024 записи по 1 минуте до полного заполнения архива
6	2 мин	1024 записи по 2 минуты до полного заполнения архива
7	4 мин	1024 записи по 4 минуты до полного заполнения архива
8	8 мин	1024 записи по 8 минут до полного заполнения архива
9	16 мин	1024 записи по 16 минут до полного заполнения архива
10	32 мин	1024 записи по 32 минуты до полного заполнения архива
11	1 час	1024 записи по 1 часу до полного заполнения архива
12	2 часа	1024 записи по 2 часа до полного заполнения архива
13	4 часа	1024 записи по 4 часа до полного заполнения архива
14–127	4 часа	Циклическое заполнение архива по 4 часа
128–254		Отсутствие архива
255		Сброс архива (очистка)

Таблица 5 – Полученные данные для построения графика

t, с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	113
T, °C	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,4	19,6	...	26,4

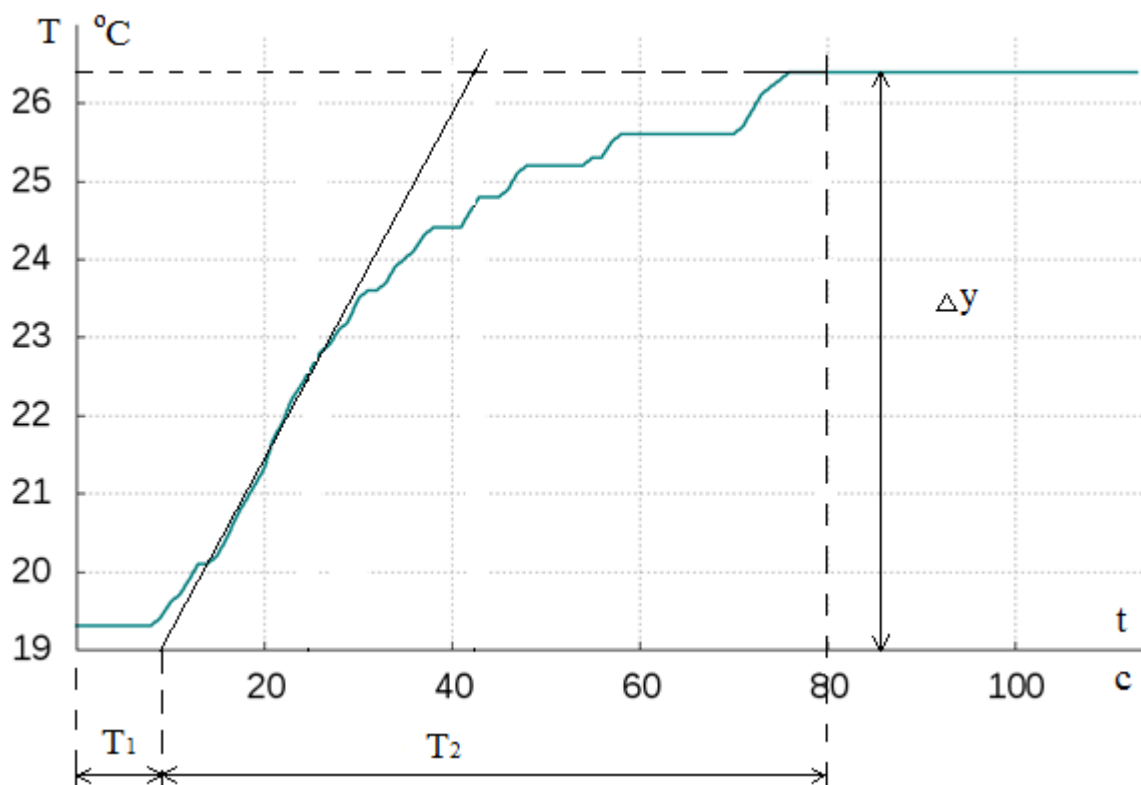


Рисунок 19 – Переходный процесс объекта управления

Из переходного процесса можно получить параметры линейной математической модели объекта второго порядка в виде передаточной функции (11):

$$\frac{k_0}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)(T_{03}p + 1)} \quad (T_{01} < T_{02} < T_{03}) \quad (11)$$

где постоянные времени объекта $T_{01} = T_{02} = 8,5/2 = 4,25$ сек., $T_{03}=23,8$ сек. Вычисляются графически из рис. 19. Коэффициент передачи объекта K_{ob} управления можно вычислить как отношение изменения выходной температуры объекта к изменению входного значения сигнала управления, поступающего в ПЧ-АД (12).

$$K_{ob} = \frac{26,4 - 19,3}{-40} = -0,18 \quad (12)$$

Настройка объекта может быть выполнена известными в теории автоматического управления средствами, такими как метод Зинглера-Николса [8,9] или эмпирическими формулами, обеспечивающие симметричный оптимум ПИД регулятора по выражениям (13):

$$k_p = \frac{T_{03}}{2\kappa_0 T_{01}} = \frac{23,8}{2 \cdot (-0,18) \cdot 4,25} = -15,56$$

$$T_i = 4T_{01} = 4 \cdot 4,25 = 17$$

$$T_d = T_{02} = 4,25$$

(13)

После определения параметров собрал структурную схему одноконтурной замкнутой САУ с ПИД – регулятором в программе CLASSIC-3 (рис. 20).

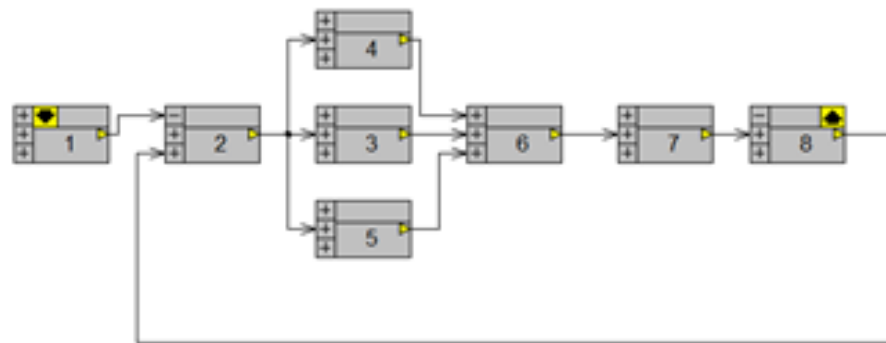


Рисунок 20 – Структурная схема одноконтурной САУ

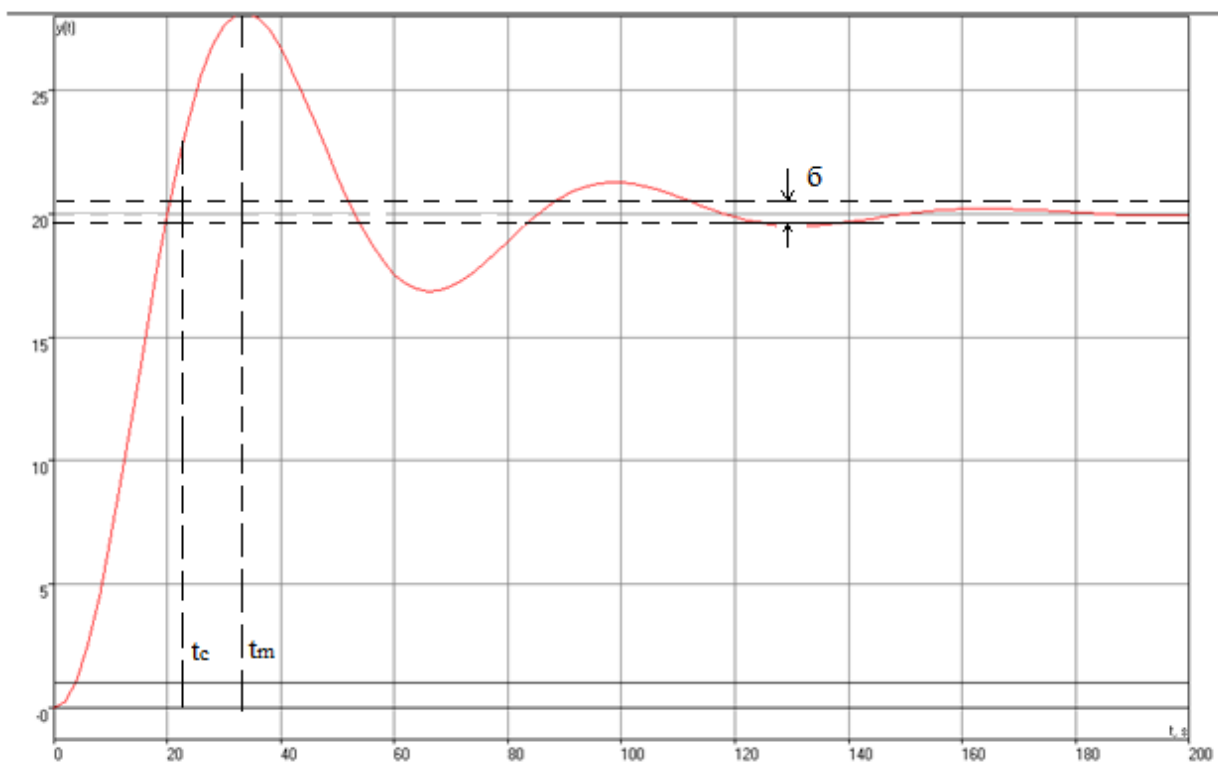


Рисунок 21 – Полученный переходный процесс

Как показано на рисунке 21 установленный регулятор поддерживает температуру. Установившееся значение 20°C , а перерегулирование составляет 12%. Как нам известно, в теории автоматического управления средствами, такими как метод Зинглера-Николса [8,9] или эмпирическими формулами, обеспечивающие симметричный оптимум (СО) для объекта без астатизма, как правило, требует ручную подстройки и доработки. Поэтому рекомендуется поменять значения интегрирование и дифференцирование (на 20-30%) для получения более качественного переходного процесса как показано на рисунке 22.

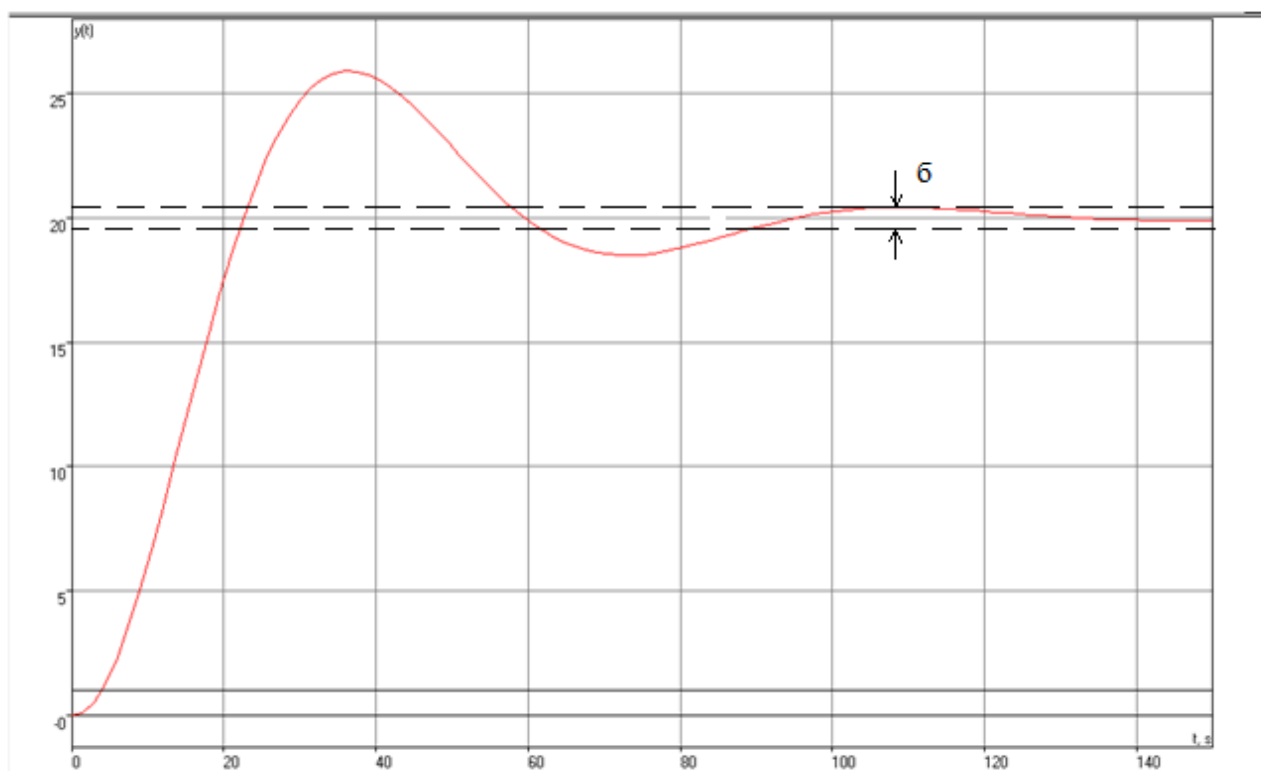


Рисунок 22 – Качественный переходный процесс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертации поставлена задача поддержания температуры в системе вентиляции, где основная проблема заключается в том, что при очень низких температурах теплоноситель, который подается на калорифер, недостаточно обеспечивает температуру воздуха. Причиной превышения температуры обратного теплоносителя является некачественный расчет калорифера, параметры которого не позволяют обеспечивать теплообмен при заданном объеме нагреваемого воздуха. В этом случае автоматическая система поддерживает заданное значение температуры обратного теплоносителя, при этом температура приточного воздуха может значительно снижаться. Удерживать температуру в заданном коридоре можно снизив объем воздуха. Также управлением потоком воздуха можно решить вторую проблему, связанную с режимами, когда температура обратного теплоносителя снижается ниже точки замерзания. Для этого предложена методика определения параметров динамической характеристики объекта управления (глава 2), проведено исследование, была сформирована динамическая модель системы вентиляции в программе CoDeSys (глава 3), получены переходные характеристики, реализована система управления. Выполненные в диссертационной работе исследования представлены следующими результатами:

1. Используя источник [11, 13, 26], представлены формулы для того, чтобы определить передаточную характеристику, определены параметры динамической характеристики модели. Поставлена задача получения переходного процесса объекта управления.
2. Используя дифференциальные уравнения (7, 8, 9, 10) была составлена FBD программа в среде CoDeSys (рис. 14). Была предложена методология получения переходного процесса в автоматизированном режиме, которая используется на любом ПЛК поддерживаемой системой *CoDeSys*.

3. Создана программа структуры на FBD-блоках (рис. 15) в среде Akiar. Реализована система управления, предоставлены экспериментальные данные для построения переходного процесса.

Исследования методов организации экспериментов в рамках действующих систем управления и программного обеспечения, построенного на функциональных блоках. По результатам экспериментов определены динамические характеристики объекта управления. Результатом работы является включение разработанной структуры регулятора в FBD логику программного обеспечения контроллера на примере среды CoDeSys и показатели качества полученных переходных процессов, где такая идея рассматривается в компании ООО «НПО ВЭСТ» в качестве дальнейшей разработки. Данную магистерскую диссертацию можно считать законченной, т.к. модель предложена и исследована.