

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.

С. В. Бывальцев, Уральский государственный университет путей сообщения (620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66), e-mail:

М. В. Зими́на, Уральский государственный университет путей сообщения (620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66), e-mail:

А. А. Шевцов, Уральский государственный университет путей сообщения (620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66), e-mail: alexrobotix@yandex.ru

Использование мехатронных модулей и робототехнических устройств в различных технологических этапах нанесения лака, краски и грунтовки должно осуществляться с помощью создания и поддержания особых условий окружающей и внутренней среды данных комплексов. Наиболее важным компонентом, требующих определенных характеристик влажности и температуры, является применение воздушных потоков в производстве автомобилей, во время процесса нанесения второго слоя грунтовки и лака, с помощью промышленных роботов *YASKAWA MOTOMAN EPX – 2700* и *YASKAWA MOTOMAN EPX – 2800*, клеящих *YASKAWA MOTOMAN ES205D*, сварочных *YASKAWA MOTOMAN ES165D* и *YASKAWA MOTOMAN ES200D*. Выполнение данных требований обеспечивает вентиляционная система предприятия, осуществляющая фильтрацию, нагрев, увлажнение поступающего воздушного потока.

При отрицательных температурах окружающего воздуха в вентиляционной системе происходит оледенение фильтрующих элементов, что приводит к снижению эффективности её работы и возникновению аварийной ситуации. Применение калориферных нагревателей позволяет обогревать приточный воздушный поток. Для решения проблемы применения нагревателей, заключающейся в определении оптимального управления вентиляционной системы, разработаны передаточные функции.

Применение метода экспертных оценок и теории оптимизации позволяет произвести синтез корректирующего звена, обеспечивающего заданные критерии качества, такие как минимальное время переходного процесса, максимальную точность и минимум ошибки перерегулирования.

Ключевые слова: оптимальное управление, метод экспертных оценок, вентиляционная система, корректирующее звено, передаточные функции.

DEVELOPMENT OF VENTILATION SYSTEM OPTIMAL CONTROL.

S. V. Byvaltsev, Ural state University of railway transport (620034, Yekaterinburg, Kolmogorova street, 66), e-mail: s_ikar@mail.ru

M. V. Zimina, Ural state University of railway transport (620034, Yekaterinburg, Kolmogorova street, 66), e-mail: marinavz@el.ru

A. A. Shevtsov, Ural state University of railway transport (620034, Yekaterinburg, Kolmogorova street, 66), e-mail: aleksandrsevcov561@gmail.com

Application of Mechatronic modules and robotic appliances at various technological stages of varnishing, painting, priming should be performed with creating and sustaining specific conditions of internal and outside environment. The most important process, requiring specific humidity and temperature level, is air flow application at such vehicle manufacturing stage as varnish or primer second layer application. Application is performed by such industrial robots as *YASKAWA MOTOMAN EPX – 2700* and *YASKAWA MOTOMAN EPX – 2800*, adhering robot *YASKAWA MOTOMAN ES205D*, welding robots *YASKAWA MOTOMAN ES165D* and *YASKAWA MOTOMAN ES200D*. Ventilation system of an enterprise provides the fulfilment of all the requirements - filtering, heating, moisturising of the intake air flow.

Filter parts inside a ventilation system get ice coated at sub-zero air temperature which ditiorates system operational efficiency. Hot-air heaters allow to warm up the incoming airflow. To solve such problem as optimal control over heaters, transfer functions have been developed.

Application of expert assessment method and optimisation theory allows to perform the synthesis of compensating element which provides specified quality criteria – shortest transiet process, highest accuracy and minimum readjustment error.

Key words: optimal control, expert assessment method, ventilation system, compensating element, transfer functions.

Одним из важнейших элементов соблюдения технологии нанесения грунтовки, краски, и лака, на кузова автомобилей, является поддержание особого микроклимата на производственных линиях и в процессе хранения. Индивидуальный микроклимат необходим в процессах сушки, обезжиривания, очистки и грунтования кузова автомобиля [4, 5]. Под микроклиматом будем понимать особые условия для использования воздушных потоков в технологическом процессе, т.е. воздушные потоки должны иметь определенные технологические параметры влажности и температуры. Нарушение параметров микроклимата приводит к неправильной работе производственных линий, нарушению технологии и подвергает опасности окружающую среду. Поддержание микроклимата рабочих установок обеспечивает вентиляционная система, которая состоит из следующих секций: сбора воздуха, фильтрации (первичная, вторичная), увлажнения, нагрева, впуска воздушного потока.

Рассмотрим этапы подготовки воздушного потока:

Первый этап. Процесс вентилирования начинается с этапа сбора воздуха, в котором происходит открытие механических демпферов с помощью электропривода, и запуск промышленных вентиляторов.

Второй этап. Процесс фильтрации воздушного потока разделяется на два вида фильтрации по степени очистки от размера загрязняющих веществ: первичная (для крупных и средних частиц) и вторичную (для мельчайших видов загрязняющих веществ)[1].

Третий этап. Процесс нагрева воздушного потока.

Четвертый этап. Процесс увлажнения воздушного потока с помощью распылительных форсунок.

Пятый этап. Процесс выпуска воздушного потока для участия в производственных процессах через механические демпфера с электроприводом.

Эти этапы приведены в виде схемы на рисунке 1.

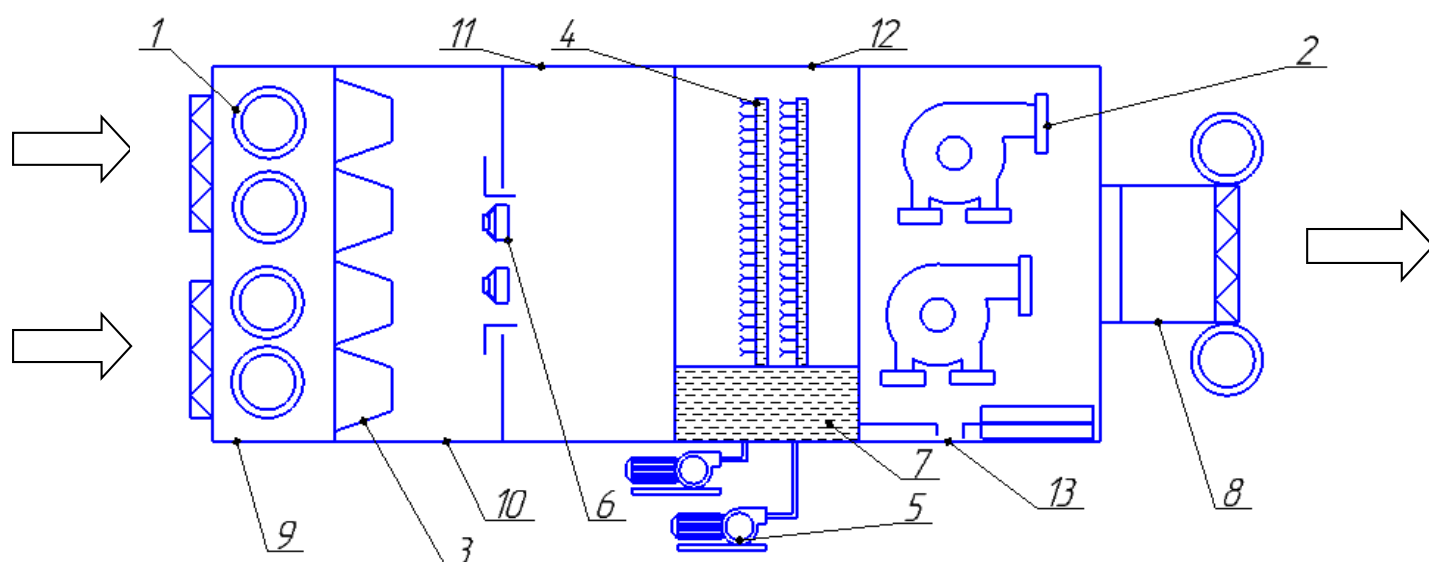


Рисунок 1 – Схема системы вентиляции

- 1– механический демпфер (сверху вниз) №1-4;
- 2– промышленные вентиляторы;
- 3– фильтры;
- 4– распылительные форсунки;
- 5– циркуляционный насос;
- 6– газовый обогревательный прибор, с открытым пламенем;
- 7– ванна с водой для увлажнения воздушного потока;
- 8– выпускная камера;
- 9–секция сбора воздушного потока;
- 10–секция фильтрации;
- 11–секция нагрева;
- 12–секция увлажнения;
- 13–секция выпуска воздушного потока

Контроль и управление системы вентиляции осуществляется с помощью промышленного контроллера. В контроллер заранее прописываются и загружаются все основные физико-химические критерии воздушного потока. Параметры состояния воздушного потока осуществляются с помощью системы датчиков: давления, температуры, влажности (см. рисунок 2).

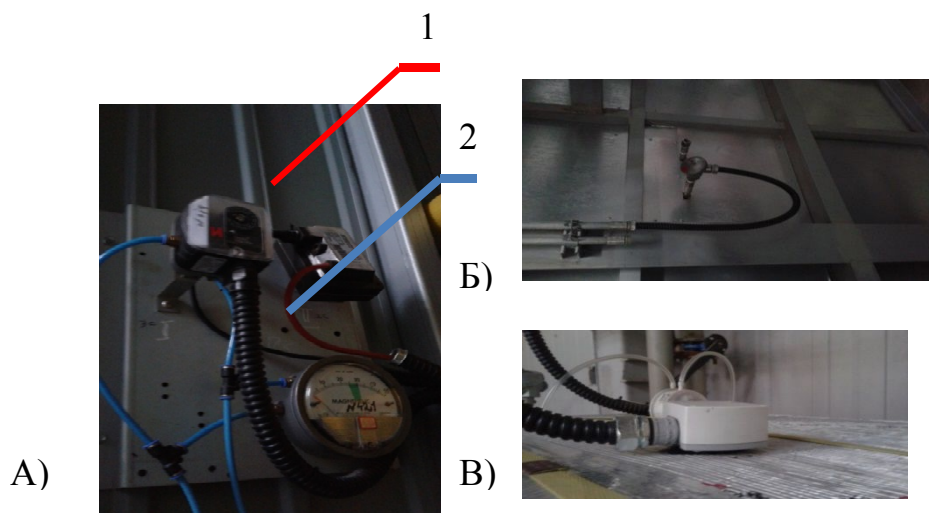


Рисунок 2 – А) изображение двух датчиков контроля за давлением: позиция 1 электронный датчик, позиция 2 механический датчик. Б) датчик температуры. В) датчик влажности.

Основная проблема работы вентиляции заключается в оледенении фильтров при отрицательных температурах приточного воздуха. Для предотвращения оледенения применили калориферный нагреватель.

Осуществим поиск наилучшей структуры управляющего устройства.

Объектом регулирования является система из двух проточных частей вентиляционной системы с калориферным нагревателем, изображенная на рисунке 3.

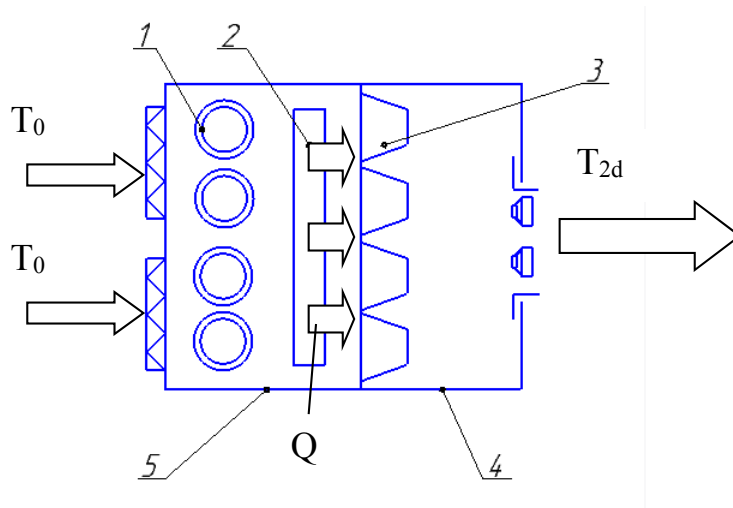


Рисунок 3–Система управления температурой

- 1– механический демпфер;
- 2–нагревательный калорифер;
- 3– воздушный фильтр;
- 4–секция фильтрации;

5– секция сбора воздуха.

Примем следующие обозначения: T_0 – температура воздушного потока, поступающего в первую часть, T_2 – температура потока, выходящего из второй части, T_{2d} – заданный уровень температуры, выходящего из второй части. Нагреватель находится в секции сбора приточного воздуха вентиляционной системы и создаёт регулируемый поток тепла Q [2].

Приведем структурную схему объекта регулирования (см. рис. 4).

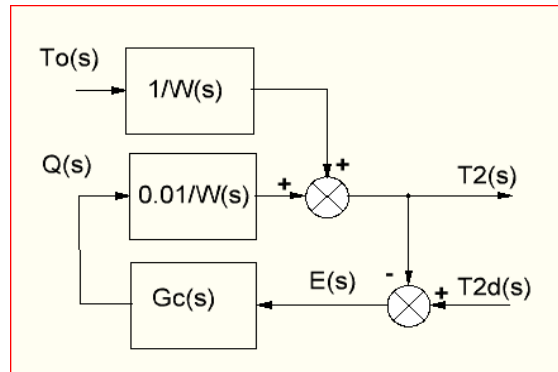


Рисунок 4– Структурная схема объекта регулирования

Выразили $T_2(s)$ через $T_0(s)$ и $T_{2d}(s)$.

Для удобства записи обозначили

$$W(s) = (\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1) = (10s + 1) \cdot (50s + 1)$$

Операторное уравнение, соответствующее структурной схеме:

$$\frac{[T_{2d}(s) - T_2(s)] \cdot G_c(s)}{100 \cdot W(s)} + \frac{T_0(s)}{W(s)} = T_2(s),$$

откуда получили выражение для $T_2(s)$ через $T_0(s)$ и $T_{2d}(s)$:

$$T_2(s) = \frac{G_c(s)}{100 \cdot W(s) + G_c(s)} \cdot T_{2d}(s) + \frac{100}{100 \cdot W(s) + G_c(s)} \cdot T_0(s), \text{ или}$$

$$T_2(s) = \frac{G_c(s)}{100 \cdot (10s + 1) \cdot (50s + 1) + G_c(s)} \cdot T_{2d}(s) + \frac{100}{100 \cdot (10s + 1) \cdot (50s + 1) + G_c(s)} \cdot T_0(s)$$

Определили переходную характеристику $T_2(t)$, считая $G_c(s) = K/s$, если $T_{2d}(s)$ мгновенно изменяется с A/s до $2A/s$ (образы скачков $A \cdot 1(t)$ и $2 \cdot A \cdot 1(t)$). Учитывали, что до скачка заданного значения температуры система находилась в стационарном состоянии.

Провели математическое моделирование считая $G_c(s) = K/s$ (см. рис. 7), и $G_c = K_1 + K_2/s$ (см. рис. 9), для второго случая обеспечим время установления температуры T_2 меньше 150 с. Значение K выбрали исходя из критерия качества (по [5] перерегулирование не должно превышать 10%).

Система управления описывается линейными дифференциальными уравнениями.

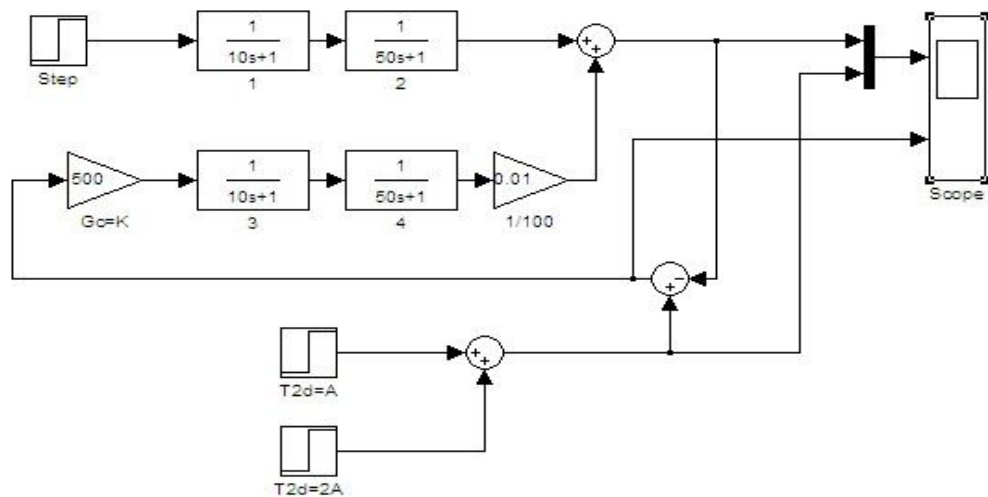


Рисунок 5– Структура математической модели системы при изменении управляющего воздействия с 30°C до 60°C (Регулятор температуры – пропорциональный)

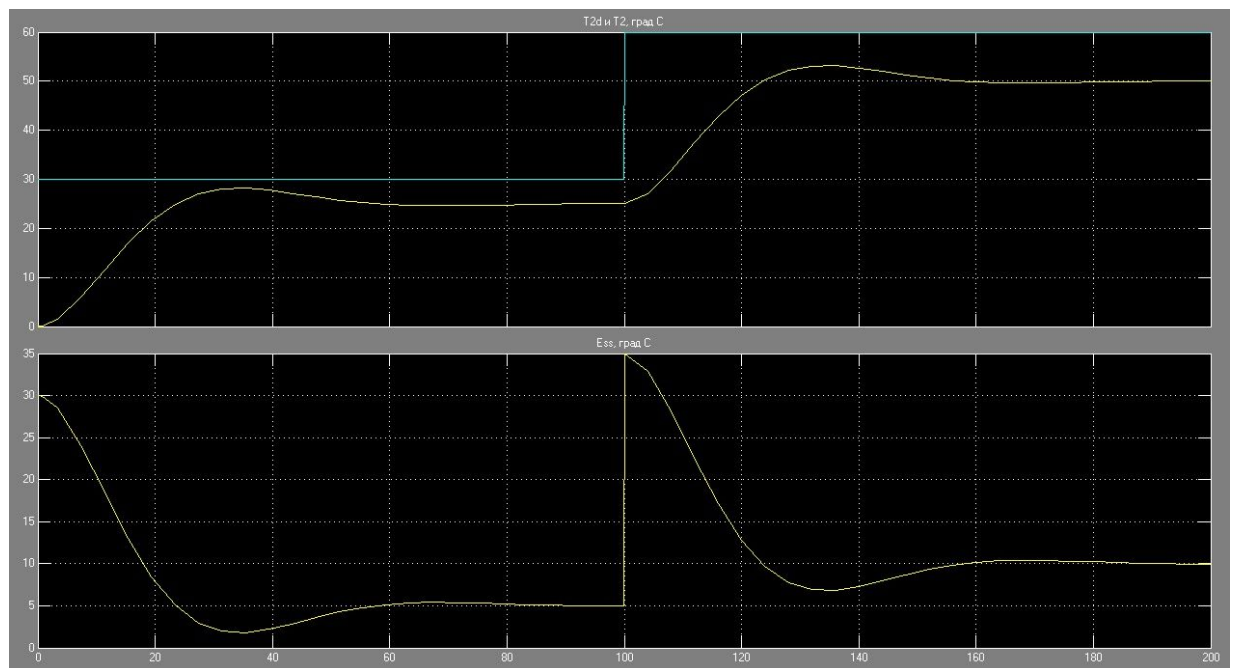


Рисунок 6 – Результаты моделирования процесса при скачкообразном изменении задания температуры с 30°C до 60°C в системе с пропорциональным регулятором.

Верхняя осциллограмма, изображенная на рисунке 6 отражает изменение сигнала температуры $T_{2d}(t)$ и фактической температуры $T_2(t)$. Процесс начинается в момент времени $t=0$ с, когда сигнал принимает значение 30°C. Время первого достижения установившегося значения – 22 с. Полное затухание процесса в системе происходит примерно за 100 с. В момент времени $t=100$ с происходит скачкообразное нарастания до

значения 60°C. Новый процесс затухает ещё через 100 с. Переходный процесс имеет быстро затухающий колебательный характер.

На нижней осциллограмме рисунка 6 показан процесс изменения ошибки регулирования $E_{ss} = T_{2d}(t) - T_2(t)$. Видно, что абсолютная величина ошибки (установившееся значение) при отработке задании 30°C равно 5°C, а при отработке задания 60°C статическая ошибка равна 10°C.

На рисунке 7 приведена структурная схема исследуемой системы с новым значением $G_c(s)$ ($G_c(s) = K/s$).

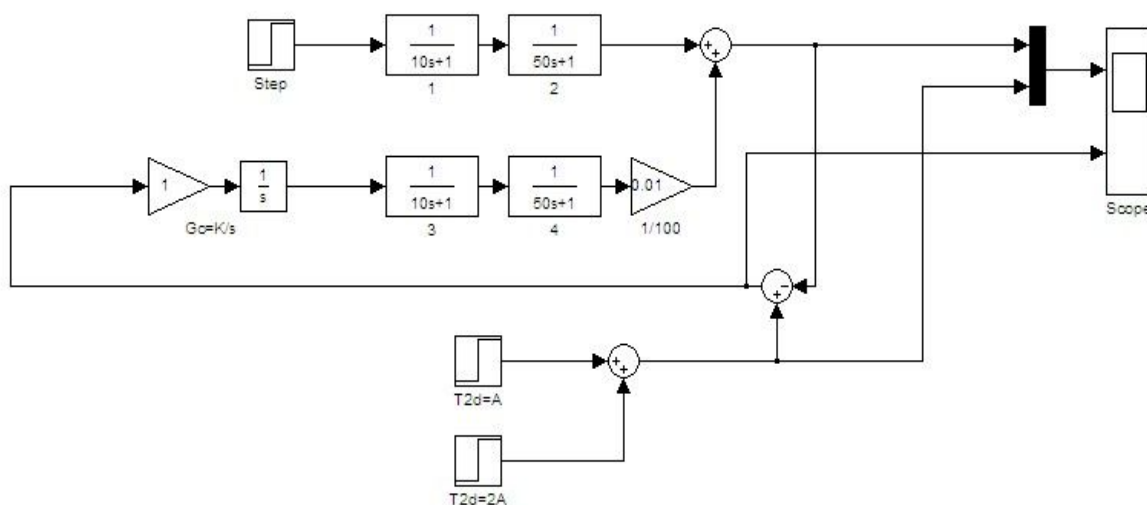


Рисунок 7 – Структура модели системы с интегральным регулятором температуры

На рисунке 8 показан процесс изменения температуры при отработке сигналов, который принимает значение 30°C в начальный момент времени и 60°C в момент времени $t = 750$ с. Видно, что при наличии интегрального регулятора ошибка регулирования (после завершения переходного процесса) равна нулю ($E_{ss}=0$). Следует отметить, что процесс стал протекать медленнее, поскольку время первого достижения установившегося значения составляет около 220 с, а время затухания переходного процесса составляет около 500 с. Коэффициент усиления интегрального регулятора $K=1$. При этом значении перерегулирование процесса не превышает 10%.

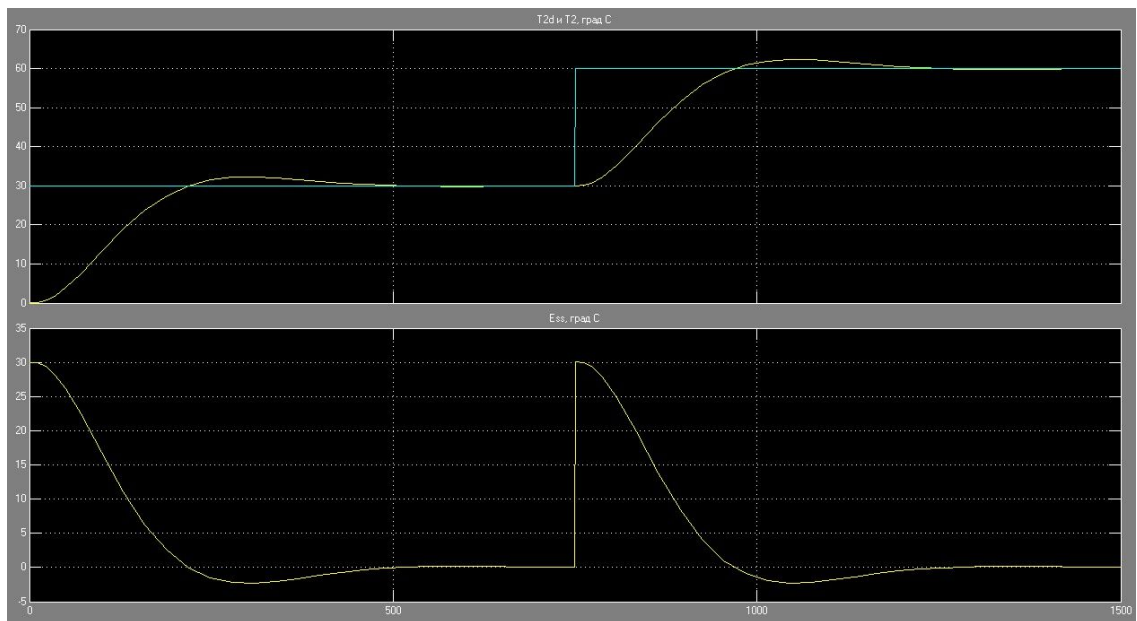


Рисунок 8 – Процессы отработки задания температуры в системе с интегральным регулятором с коэффициентом усиления $K=1$

На рисунке 9 показана структура модели системы с пропорционально-интегральным регулятором температуры.

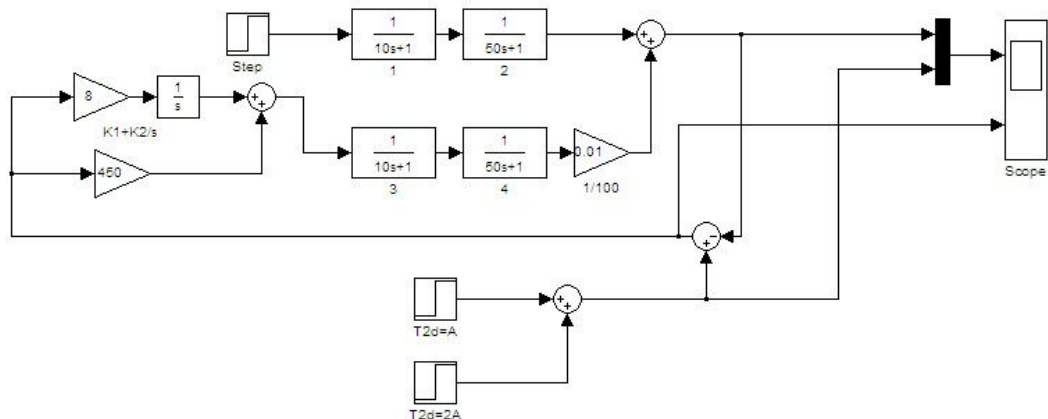


Рисунок 9 – Структурная схема модели системы регулирования с пропорционально-интегральным регулятором температуры

Коэффициенты $K_1=8$ и $K_2=450$ подобраны так, чтобы время установления температуры T_2 было меньше 150 с и относительное перерегулирование менее 10%, что показано на осциллограммах процессов на рисунке 10.

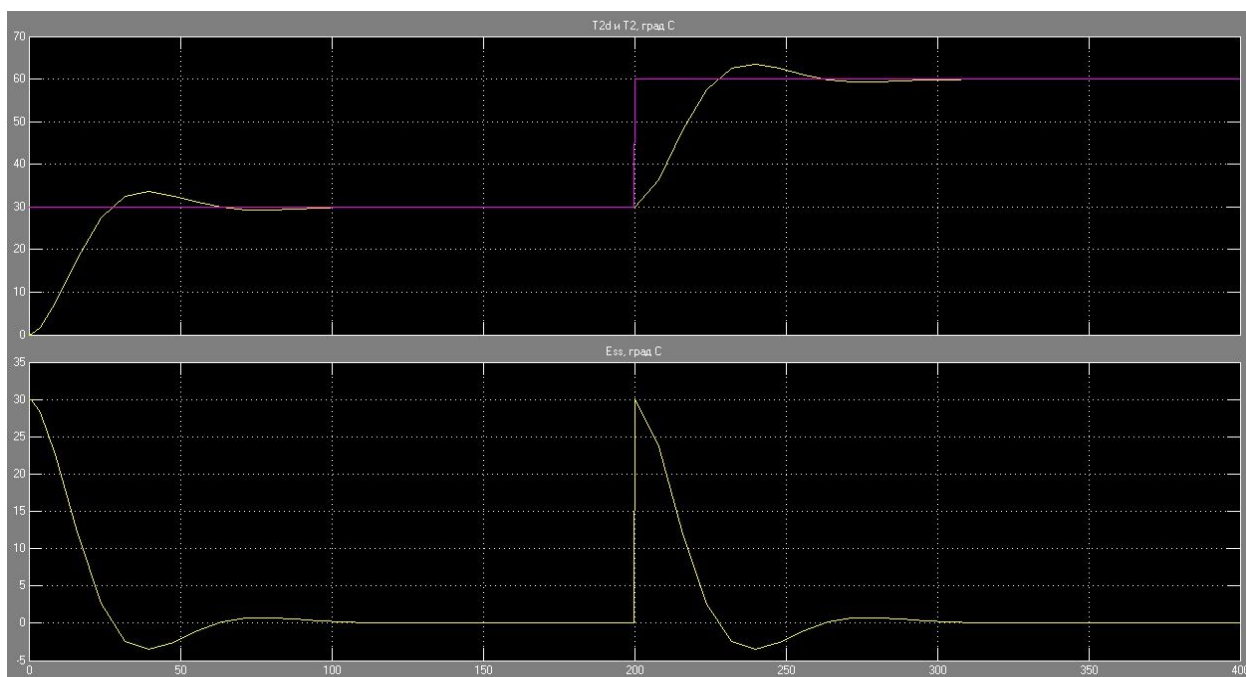


Рисунок 10 – Процессы в системе с пропорционально-интегральным регулятором температуры

Видно, что качественные показатели процесса регулирования лучше, чем в предыдущих системах.

Полученные результаты свели в таблицу 1

Таблица 1– результаты математического моделирования

Вид регулятора	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %	Установившаяся ошибка регулирования, %
Пропорциональный	100	$3 / 30 \cdot 100\% = 10\%$	$5 / 30 \cdot 100\% = 16.7\%$
Интегральный	600	$2 / 30 \cdot 100\% = 6.7\%$	0%
ПИ-регулятор	120	$3 / 30 \cdot 100\% = 10\%$	0%

Для определения оптимального типа регулятора необходимо задать на основе экспертных оценок критерии значимости, приведённые в таблице 2[3].

Таблица 2– экспертные оценки значимости

Критерий значимости	Время переходного процесса	Перерегулирование	Установившаяся ошибка регулирования
Обозначение	A1	A2	A3
Величина	0.25	0.25	0.5

$$J_i = K_1 \cdot A_1 + K_2 \cdot A_2 + K_3 \cdot A_3$$

$$J_1 = \frac{100}{600} \cdot 0.25 + \frac{10}{10} \cdot 0.25 + \frac{16.7}{16.7} \cdot 0.5 = 0.792$$

$$J_2 = \frac{600}{600} \cdot 0.25 + \frac{6.7}{10} \cdot 0.25 + \frac{0}{16.7} \cdot 0.5 = 0.417$$

$$J_3 = \frac{120}{600} \cdot 0.25 + \frac{10}{10} \cdot 0.25 + \frac{0}{16.7} \cdot 0.5 = 0.3$$

Оптимальным вариантом, согласно полученным результатам, является пропорционально-интегральный регулятор

Обсуждение результатов:

Изложили этапы технологии работы вентиляционной системы. Разработали передаточные функции для решения проблемы применения нагревателей, заключающейся в определении оптимального управления вентиляционной системы. Получили требуемое качество переходного процесса, рассмотрели различные структуры (П-,И-,ПИ-) регуляторов. Применили метод экспертных оценок и теорию оптимизации для синтеза корректирующего звена.

Результаты исследования показывают, что наилучшим вариантом выбора регулятора для данной системы является применение пропорционально-интегрального регулятора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Готлиб Б. М. Введение в мехатронику: Учебное пособие в двух томах. Т. 2. Проектирование и применение мехатронных модулей и систем. – Екатеринбург: УрГУПС, 2008. – 302 с.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. –Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 831 с.: ил. ISBN 5-93208-119-8
3. Ширяева М.С. Принятие решений на основе задач линейной оптимизации // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3-1.; URL: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=18223> (дата обращения: 01.05.2018).
4. Шевцов А.А., Филиппова Е.Г. Исследование автоматизированного процесса обезжиривания, очистки и грунтования кузова автомобилей с последующей модификацией насосного оборудования // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 5
URL: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=17336> (дата обращения: 01.05.2018).
5. Шевцов А.А., Филиппова Е.Г. Описание технологии автоматизированных процессов нанесения второго слоя грунтовки, лакокрасочных работ, сушки, контроля качества кузовов автомобилей с улучшением данных производственных участков // Международный студенческий научный вестник.–2017.–№6.; URL: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=17875> (дата обращения: 01.05.2018).