

Математическое моделирование объекта управления для систем контроля температуры

А.А. Ковшевный¹, В.Г. Лисиенко²

*¹АО «НПО автоматики», Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург
²Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург*

Аннотация: В статье рассмотрено устройство имитации объекта управления для автоматизированных систем контроля температуры, приведена математическая модель процессов нагрева и охлаждения изолированного помещения, проведено моделирование температурных воздействий на объект управления, также приведен метод реализации имитации объекта управления на микроконтроллере.

В статье описаны схемотехнические решения, применяемые в исполнительной части.

Математические модели, рассмотренные в статье, распространяются на большинство автоматизированных систем контроля температуры, так как область их применения типична для подобного рода помещений. Учитывая простоту модели, имитатор имеет высокую скорость вычислений. Также прибор даст возможность отслеживать реакцию системы на динамические изменения ее параметров, таких как:

- температура внешней среды;
- скорость потока воздуха;
- температура охлаждающей жидкости;
- и т.д.

Устройство позволит проводить отладку и проверку автоматизированных систем контроля температуры в лабораторных условиях, что повысит качество разрабатываемых систем контроля температуры.

Ключевые слова: контроль температуры, автоматизация процесса контроля температуры, математическое моделирование.

Непрерывный контроль измерения температуры является важной задачей во многих отраслях промышленности и повседневной жизни. Обеспечение постоянства температуры - важный аспект технических процессов, применяемых в металлургии, атомной и космической промышленности, сельском хозяйстве, для поддержания комфортной для проживания человека температуры и многих других [1-3]. Приведенный в статье метод имитации объекта управления позволяет путем проведения дополнительных проверок повысить качество разрабатываемых автоматизированных систем контроля температуры. На рисунке 1 приведена типовая структурная схема системы контроля температуры.

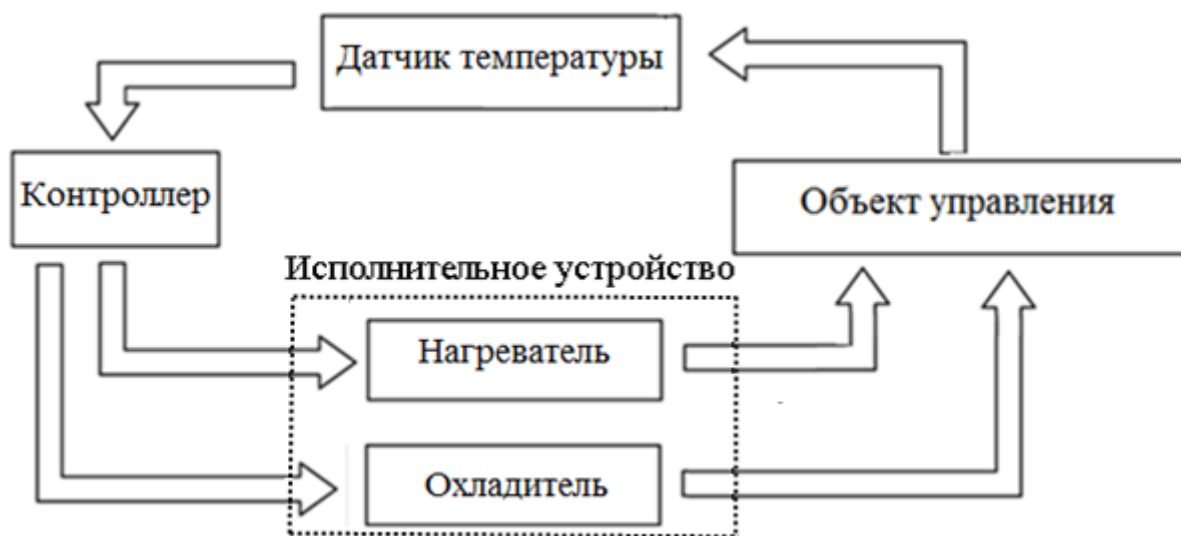


Рисунок 1. – Структурная схема системы контроля температуры.

Основные части системы:

- датчик температуры используется для измерения температуры объекта управления;
- объект управления – объект, температура которого контролируется системой управления;
- исполнительное устройство, включающее в себя нагреватель и охладитель для регулирования температуры;
- контроллер, реализующий требуемый алгоритм управления, например, поддержание требуемой температуры;

Исполнительное устройство, включающее в себя термоэлектрический нагреватель (ТЭН) и охладитель, управляется сигналами микроконтроллера.

На этапах разработки систем данного типа возникает потребность в их отладке, которая включает в себя этап проверки заложенных в контроллер законов управления, требуемой реакции системы в заданных условиях [4]. Ставится задача имитации объекта управления для проведения испытания и отработки аппаратно-программного комплекса.

Приведенное решение по сравнению с компьютерным моделированием проверяет конкретную программно-аппаратную реализацию, то есть решает вышеуказанные задачи.

Рассмотрим исходные данные, заданные для системы управления:

1. В качестве датчика температуры системы управления выбрано платиновое термосопротивление типа ТСП/1 с номинальной статической характеристикой 100П. Номинальное сопротивление при 0°C $R_0 = 100 \text{ Ом}$. Коэффициент температурного сопротивления $\alpha = 0,00391 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, что соответствует изменению сопротивления от 96,09 до 119,55 Ом в диапазоне температур от -10 до $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. На рисунке 2 приведена НСХ ТСП/1 (ГОСТ 6651-94).

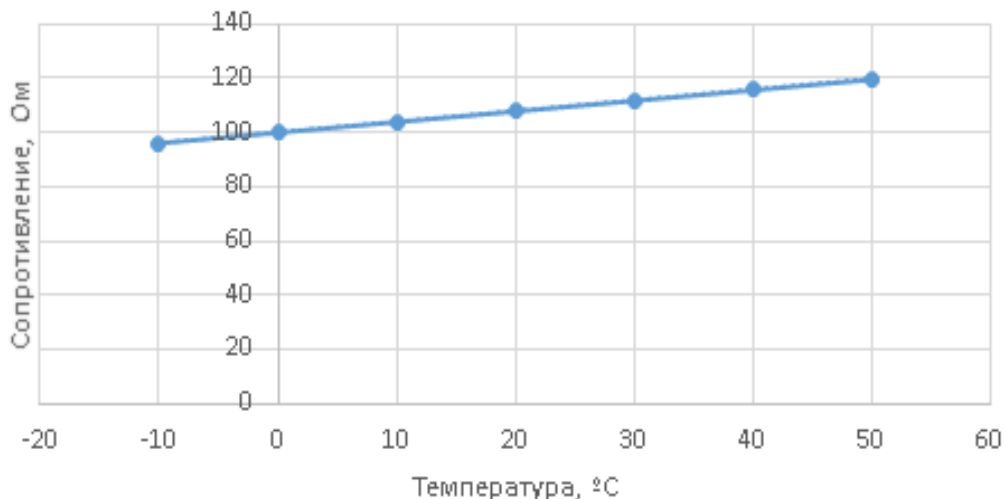


Рисунок 2. – Номинальная статическая характеристика 100П.

На рисунке 3 приведена упрощенная схема включения термосопротивления в систему управления [5].

Измеритель задает постоянный ток $I_{\text{изм}}$. По току и напряжению определяется сопротивление R_t и далее пересчитывается в температуру [6].

Для имитации термосопротивления предлагается структурная схема имитатора, представленная на рисунке 4.

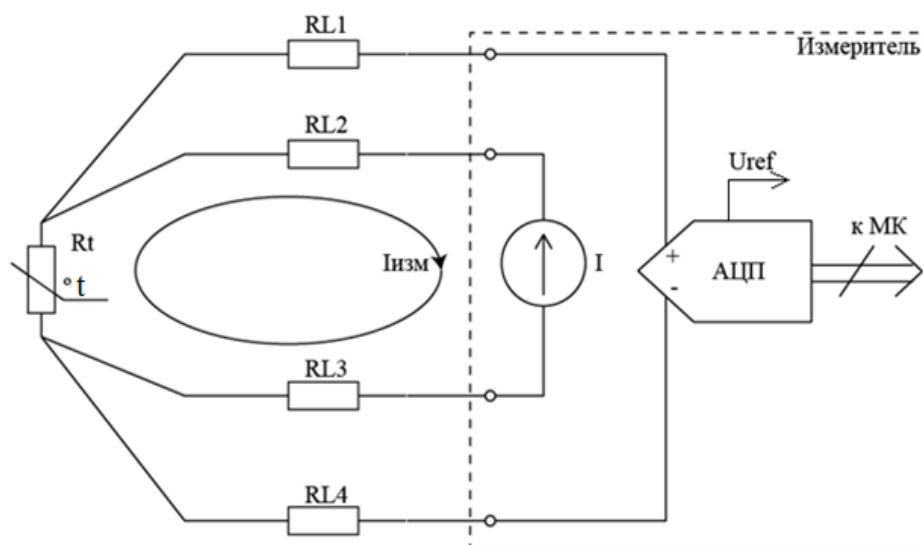


Рисунок 3. – Используемая упрощенная схема включения термосопротивления.

Где R_t – терморезистор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; I – измерительный источник стабильного тока; $RL1...RL4$ – паразитные сопротивления проводников; U_{ref} – опорное напряжение АЦП; МК – микроконтроллер; $I_{изм}$ – измерительный ток.

Схема имитатора управляется напряжением, задаваемым с ЦАП ($U_{цап}$), который управляется микроконтроллером. Измерение термосопротивления производится при подаче постоянного заданного тока $I_{изм}$ и измерении падения напряжения на резисторе R_2 . По отношению напряжения к заданному току на резисторе определяется сопротивление, измеритель производит перерасчёт сопротивления в температуру. Операционный усилитель U_1 служит для согласования напряжения ЦАП с нагрузкой. Напряжение на резисторе R_2 определяется током $I_{изм}$ и током операционного усилителя U_1 (I_{u1}), включенного как генератор постоянного тока.

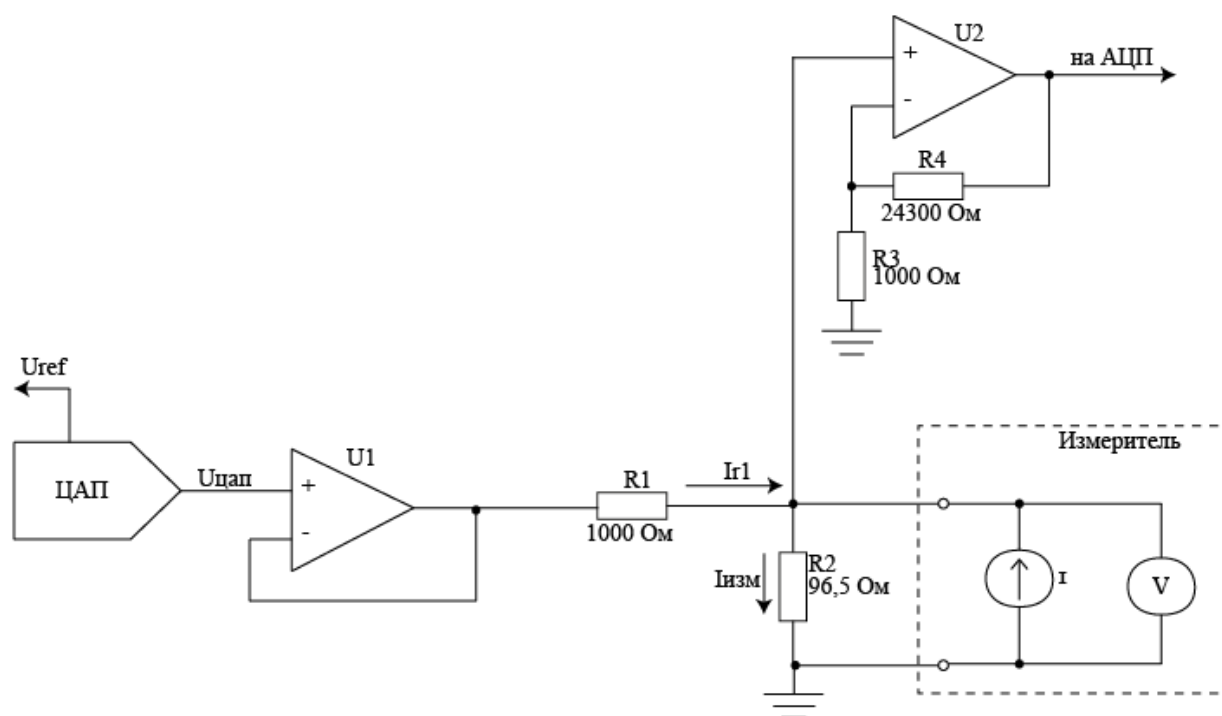


Рисунок 4. – Схема имитатора термосопротивления.

Методом контурных токов можно определить напряжение на резисторе R2 и, соответствующее ему, выходное сопротивление имитатора $R_{им}$:

$$R_{им} = \frac{R2}{I_{изм} (R1+R2)} (I_{изм} R1 + U_{цап}). \quad (1)$$

Из полученной формулы (1) видно, что сопротивление имитатора ($R_{им}$) изменяется линейно в зависимости от $U_{цап}$ при постоянном заданном измерительном токе измерителя. Рабочий диапазон термосопротивления, таким образом, можно рассчитать по формуле (2):

$$\frac{R1 R2}{R1+R2} \leq R_{им} \leq \frac{R1 R2}{R1+R2} + \frac{U_{цап_{MAX}} R2}{I_{изм} (R1+R2)}. \quad (2)$$

Задав минимальное R_{MIN} и максимальное R_{MAX} значение имитируемого сопротивления, R1 и R2 можно рассчитать по формулам (3), (4):

$$R1 = \frac{U_{цап_{MAX}} R_{MIN}}{I_{изм} (R_{MAX} - R_{MIN})}. \quad (3)$$

$$R2 = \frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{I_{\text{ИЗМ}}} \frac{R_{\text{MIN}}}{\frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{I_{\text{ИЗМ}}} - (R_{\text{MAX}} - R_{\text{MIN}})}. \quad (4)$$

Погрешность задания сопротивления $\Delta R_{\text{ИМ}}$ зависит от разрядности ЦАП $r_{\text{ЦАП}}$ и выбора измерительного тока $I_{\text{ИЗМ}}$ (5):

$$\Delta R_{\text{ИМ}} = \frac{1}{I_{\text{ИЗМ}}} \frac{R2}{(R1 + R2)} \frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{2^{r_{\text{ЦАП}}}}. \quad (5)$$

Погрешность задания сопротивления $\Delta R_{\text{ИМ}}$, обусловленная отклонением $R1$ и $R2$ от номинальных значений, можно определить, взяв полный дифференциал $\Delta R_{\text{ИМ}}$ по $R1$ и $R2$, и учитывая, что $\Delta R = R \cdot \delta R$, где δR относительное отклонение сопротивления от номинала.

Максимальное возможное отклонение температуры от заданной в этом случае определяется формулой (6).

$$\Delta t = \pm \frac{R1}{R1 + R2} \cdot \delta R_{\text{max}} \cdot \text{Max} \left[\frac{R2}{R0 \cdot \alpha}, \left| \frac{2R0 - R2}{R0 \cdot \alpha} + 2 \cdot t \right| \right]. \quad (6)$$

Операционный усилитель $U2$ используется для определения измерительного тока источника $I_{\text{ИЗМ}}$ с последующей обработкой АЦП микроконтроллера (на схеме не показан) для калибровки имитатора.

В расчете сопротивлений $R1$ и $R2$ за ток $I_{\text{ИЗМ}}$ системы контроля примем максимально допустимый – 1 мА. Сопротивления $R1$ и $R2$ подобраны таким образом, что позволяет снизить погрешность имитируемого сопротивления. Погрешность установки $R_{\text{ИМ}}$, обусловленная дискретностью установки напряжения на АЦП ($\Delta U_{\text{DAC}} = 38$ мкВ) при выборе измерительного тока $I_{\text{ИЗМ}}$ в диапазоне (0,1 – 1) мА, составляет $\pm(0,002 - 0,0002)$ Ом, что соответствует погрешности задания температуры $\pm(0,005 - 0,0005)$ °С.

Сопротивления $R3$, $R4$ операционного усилителя $U2$ служат для задания усиления, оптимального для динамического диапазона АЦП. Диапазон входного напряжения АЦП ограничен сверху опорным

напряжением микроконтроллера – 2,56 В. Чтобы исключить большое энергопотребление ток делителя задан в 1 мА. Чтобы привести входное напряжение U_2 к динамическому диапазону АЦП зададим коэффициент усиления 25, тогда R_3, R_4 примем равными 1 кОм и 24,3 кОм соответственно [7].

Имитатор имеет два режима работы, а именно: режим охлаждения и режим нагрева. Управление устройством осуществляется путем передачи с контроллера сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и установки угла заслонки (α), при $\alpha_{\max} = 90^\circ$. В режиме нагрева, при регулировании коэффициента заполнения сигнала $K_{\text{ШИМ}}$, происходит имитация сигнала с датчика температуры ТСП/1, α при этом устанавливается в нулевое значение. Режим охлаждения, представленный на рисунке 6, осуществляется с помощью кондиционера, обеспечивающего циркуляцию воздуха в помещении, а отвод тепла от воздуха осуществляется потоком жидкости. В данном режиме регулируется поток воды, а именно угол заслонки α , $K_{\text{ШИМ}}$ при этом равен нулю. Для имитации реального объекта была разработана модель процесса нагрева и охлаждения, представленного в виде комнаты, состоящей из шести ограждающих конструкций.

Модель процесса нагрева

Модель процесса нагрева показана на рисунке 5.

На рисунке 5 показаны следующие обозначения: l – ширина стен; $P_{\text{нагр}}$ – мощность, передаваемая от нагревателя складированным объектам; $P_{\text{внеш}}$ – мощность, передаваемая во внешнюю среду; $T_{\text{внеш}}$ – температура внешней среды; T – температура воздуха внутри помещения и температура складированных объектов.

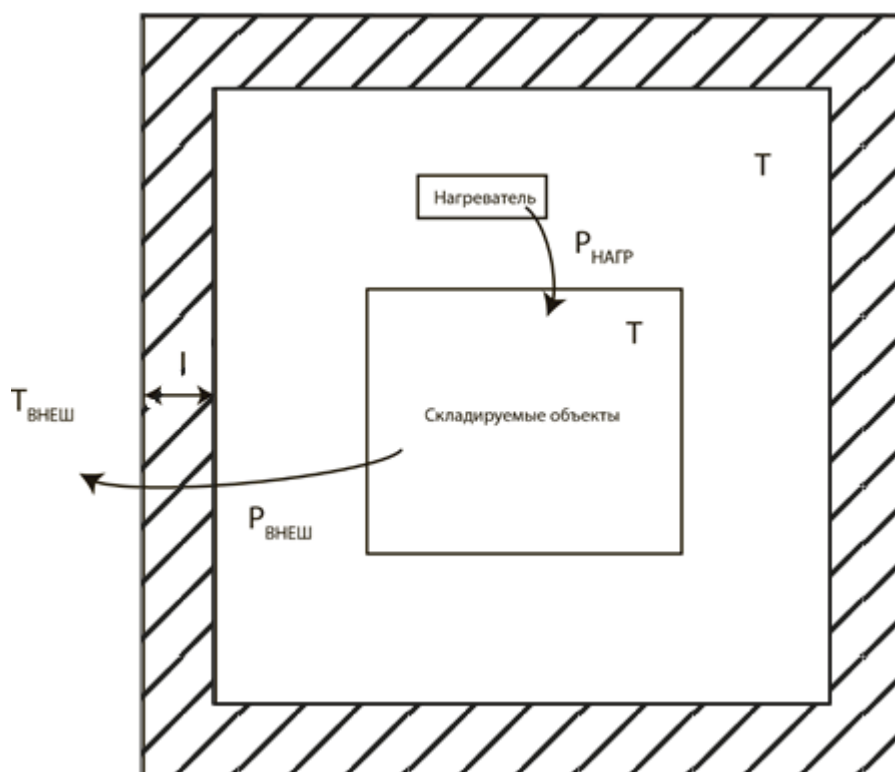


Рисунок 5. – Модель процесса нагрева.

При построении модели были приняты следующие допущения:

1. Теплопроводность стен, их толщина и площадь постоянны.
2. Температура воздуха в помещении и температура складирuемых объектов равны.
3. Теплоемкость воздуха и стен в помещении не учитывается, так как она значительно ниже теплоемкости складирuемых объектов.

Пусть теплоемкость объекта управления равна C , тогда согласно определению теплоемкости:

$$dT = \frac{dQ}{C}, \quad (7)$$

где dT – приращение температуры объекта контроля; dQ – приращение энергии объекта контроля.

Прирост энергии объекта контроля dQ складывается из энергии, отдаваемой нагревателем $dQ_{\text{НАГР}}$ и убыли энергии (теплоотводу) через стены $dQ_{\text{ВНЕШ}}$:

$$dQ = dQ_{\text{НАГР}} - dQ_{\text{ВНЕШ}}. \quad (8)$$

Так как нагреватель имеет достаточно низкую теплоемкость относительно объекта контроля, можно считать ее равной нулю, из чего следует, что вся энергия, получаемая нагревателем $dQ_{\text{НАГР}}$, передается объекту управления. Тогда энергия, передаваемая объекту контроля за промежуток времени dt , выражается как:

$$dQ_{\text{НАГР}} = P \cdot dt, \quad (9)$$

где P – мощность, подводимая нагревателю.

Так как частота следования ШИМ-сигнала значительно больше, чем скорости всех остальных рассматриваемых переходных процессов, в расчетах будем рассматривать только среднюю подводимую мощность на нагреватель (определяется коэффициентом заполнения ШИМ-сигнала – $K_{\text{ШИМ}}$).

Энергия, передаваемая нагревателем, зависит от его максимальной мощности $P_{\text{МАХ}}$ и коэффициента заполнения ШИМ-сигнала:

$$dQ_{\text{НАГР}} = K_{\text{ШИМ}} \cdot P_{\text{МАХ}} \cdot dt. \quad (10)$$

Энергетические потери объекта управления определяются теплопроводностью χ его стен, их площадью S , толщиной l и разностью температур на противоположных сторонах, мощностью потока энергии от объекта контроля во внешнюю среду $P_{\text{ВНЕШ}}$. Поток тепла от одной грани параллелепипеда к другой определяется как:

$$P_{\text{ВНЕШ}} = \chi \cdot \frac{S}{l} \cdot (T - T_{\text{ВНЕШ}}), \quad (11)$$

где S – общая площадь помещения.

Тогда энергия, передаваемая от объекта контроля во внешнюю среду за промежуток времени dt :

$$dQ_{\text{ВНЕШ}} = \chi \cdot \frac{S}{l} \cdot (T - T_{\text{ВНЕШ}}) \cdot dt. \quad (12)$$

На основании формул (7), (8), (10) и (12):

$$dT = \frac{dQ}{c} = \frac{dQ_{\text{НАГР}} - dQ_{\text{ВНЕШ}}}{c} = \frac{K_{\text{ШИМ}} \cdot P_{\text{МАХ}} \cdot dt - \chi \cdot \frac{S}{l} \cdot (T - T_{\text{ВНЕШ}}) \cdot dt}{c}. \quad (13)$$

Таким образом, модель данного процесса – линейное дифференциальное уравнение (ЛДУ) первого порядка (14) [8].

$$\dot{T} = \frac{K_{\text{ШИМ}} \cdot P_{\text{МАХ}}}{c} + \frac{\chi \cdot S \cdot T_{\text{ВНЕШ}}}{l \cdot c} - \frac{\chi \cdot S}{l \cdot c} \cdot T. \quad (14)$$

Модель процесса охлаждения

В режиме охлаждения задается угол открытия затвора α охлаждающей жидкости, задающей отношение потока жидкости, проходящей через радиатор, к пропущенной напрямую, как показано на рисунке 6.

Для данной модели также действительно уравнение (7), но прирост энергии объекта контроля dQ складывается из убыли энергии через кондиционер (энергии, отводимой кондиционером) $dQ_{\text{КОНД}}$ и убыли энергии через стены $dQ_{\text{ВНЕШ}}$:

$$dQ = -dQ_{\text{КОНД}} - dQ_{\text{ВНЕШ}}. \quad (15)$$

Убыль энергии через стены определяется также уравнением (15). Так как объем воздуха, постоянно находящийся в кондиционере, пренебрежимо мал по сравнению с объемом воздуха объекта управления, можно считать, что воздух охлаждается мгновенно, проходя через границу раздела так же, как и вода.

Убыль энергии через кондиционер за время dt можно определить исходя из теплоемкости воздуха $dC_{\text{В}}$, проходящего за это время через

кондиционер и разности температур воздуха на входе T и на выходе кондиционера $T_{\text{конд}}$:

$$dQ_{\text{конд}} = dC_{\text{в}} \cdot (T - T_{\text{конд}}). \quad (16)$$

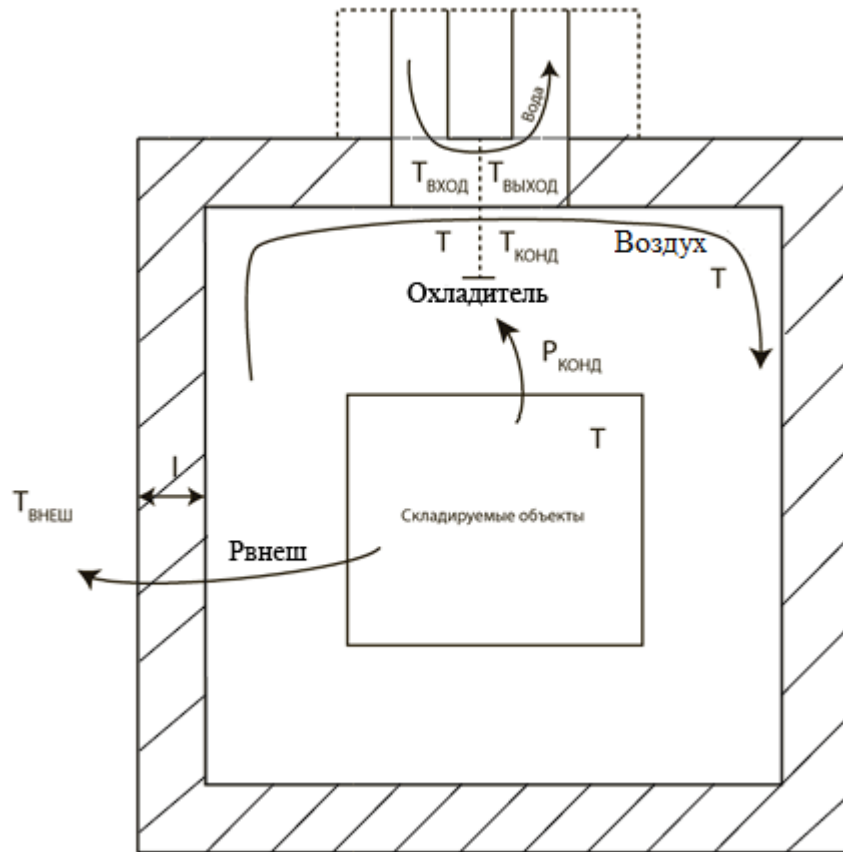


Рисунок 6. – Модель охлаждения объекта управления.

Теплоемкость воздуха, проходящего за интервал времени dt , можно определить через его удельную теплоемкость $c_{\text{возд}}$, объемный поток через кондиционер $Q_{\text{в.возд}}$, и его плотность $\rho_{\text{возд}}$:

$$dC_{\text{в}} = c_{\text{возд}} \cdot Q_{\text{в.возд}} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot dt. \quad (17)$$

Тогда убыль энергии воздуха, проходящего через кондиционер за время dt :

$$dQ_{\text{конд.возд}} = c_{\text{возд}} \cdot Q_{\text{в.возд}} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot (T - T_{\text{конд}}) \cdot dt. \quad (18)$$

Подобным образом можно показать, что убыль энергии через кондиционер за время dt через теплоемкость воды, массовый поток воды

через кондиционер $Q_{m.ВОДЫ}$ и разность температур воды на входе и выходе выражается формулой (19):

$$dQ_{\text{конд.воды}} = c_{\text{воды}} \cdot Q_{m.ВОДЫ} \cdot (T_{\text{ВЫХОД}} - T_{\text{ВХОД}}) \cdot dt. \quad (19)$$

Массовый поток воды регулируется котроллером путем изменения угла открытия затвора. Тогда, считая, что поток пропорционален углу открытия, и зная максимальный поток $Q_{m.ВОДЫ.МАХ}$, убыль энергии через кондиционер за время dt :

$$dQ_{\text{конд.возд}} = dQ_{\text{конд.воды}} = dQ_{\text{конд.}} \quad (20)$$

$$dQ_{\text{конд}} = c_{\text{воды}} \cdot \frac{\alpha}{90} \cdot Q_{m.ВОДЫ.МАХ} \cdot (T_{\text{ВЫХОД}} - T_{\text{ВХОД}}) \cdot dt.$$

Также убыль энергии через кондиционер за время dt можно определить, исходя из максимальной мощности, которую он способен поглотить (мощность, потребляемая кондиционером) $P_{\text{конд.МАХ}}$ и его коэффициент полезного действия (КПД) η :

$$dQ_{\text{конд}} = \eta \cdot P_{\text{конд. МАХ}} \cdot dt. \quad (21)$$

Максимальная мощность кондиционера достигается в случае равенства температур воды на выходе теплообменника ($T_{\text{ВЫХОД}}$) и воздуха на выходе кондиционера ($T_{\text{конд}}$). Тогда, исходя из вышесказанного и уравнений (19) и (20), температура воздуха и воды на выходе для идеального кондиционера $T_{\text{конд.МИН}}$:

$$T_{\text{конд.МИН}} = \frac{\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot T_{\text{ВХОД}} + K_{\text{ВОЗД}} \cdot T}{\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}}, \quad (22)$$

где:

$$K_{\text{ВОДЫ}} = \frac{c_{\text{ВОДЫ}} \cdot Q_{m.ВОДЫ.МАХ}}{90};$$

$$K_{\text{ВОЗД}} = c_{\text{ВОЗД}} \cdot Q_{V.ВОЗД} \cdot \rho_{\text{ВОЗД}}$$

Расход энергии через кондиционер за время dt в случае равенства температур $T_{\text{ВЫХОД}}$ и $T_{\text{КОНД}}$:

$$dQ_{\text{КОНД,МАХ}} = P_{\text{КОНД, МАХ}} \cdot dt. \quad (23)$$

$$dQ_{\text{КОНД,МАХ}} = c_{\text{ВОДЫ}} \cdot Q_{\text{т.ВОДЫ}} \cdot (T_{\text{КОНД,МИН}} - T_{\text{ВХОД}}) \cdot dt. \quad (24)$$

Тогда максимальная мощность кондиционера, достигаемая в случае равенства температур:

$$P_{\text{КОНД, МАХ}} = c_{\text{ВОДЫ}} \cdot Q_{\text{т.ВОДЫ}} \cdot (T_{\text{КОНД,МИН}} - T_{\text{ВХОД}}). \quad (25)$$

Исходя из (21), (22) и (25) убыль энергии через кондиционер за время dt :

$$dQ_{\text{КОНД}} = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}}}{\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}} \cdot (T - T_{\text{ВХОД}}) \cdot dt. \quad (26)$$

Сделаем соответствующие замены в (7), (14), (15), и (25):

$$dT = \frac{\chi \cdot S \cdot T_{\text{ВНЕШ}}}{l \cdot c} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{ВХОД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot c} - \left(\frac{\chi \cdot S}{l \cdot c} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot c} \right) \cdot T \cdot dt. \quad (27)$$

Таким образом, модель данного процесса – также линейное дифференциальное уравнение (ЛДУ) первого порядка (28) [8].

$$\dot{T} = \frac{\chi \cdot S \cdot T_{\text{ВНЕШ}}}{l \cdot c} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{ВХОД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot c} - \left(\frac{\chi \cdot S}{l \cdot c} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot c} \right) \cdot T. \quad (28)$$

Для моделирования примем параметры объекта управления, представленные в таблице 1 [9].

График реакции объекта контроля, с параметрами, указанными выше в режиме нагрева ($K_{\text{ШИМ}} = 0,7$), представлен на рисунке 7. Постоянная времени ($\tau_{\text{нагр}}$) – 1,20 ч, предельная температура ($T_{\infty \text{нагр}}$) – 39,4 °С.

График реакции объекта управления в режиме охлаждения, с параметрами, указанными выше и $\alpha = 63$ °, представлен на рисунке 8. Постоянная времени ($\tau_{\text{охл}}$) – 0,36 ч, предельная температура ($T_{\infty \text{охл}}$) – 3,51 °С.

Таблица №1

Параметры объекта управления

Параметр	Обозначение	Величина
Начальная температура	T_0	10 °С (283,15 К)
Температура внешней среды	$T_{\text{ВНЕШ}}$	0 °С (273,15 К)
Температура воды на входе кондиционера	$T_{\text{ВХОД}}$	5 °С (278,15 К)
Теплопроводность стен (пенопласт)	χ	0,037 Вт/(м· К)
Общая площадь помещения	S	$6 \cdot 10^2 \text{ м}^2$
Ширина стен	l	0,1 м
Теплоемкость складированных объектов (2 т. стали)	C	$2 \cdot 10^3 \cdot 480 \cdot \text{Дж/К}$
Удельная теплоемкость воздуха	$c_{\text{ВОЗД}}$	1000 Дж/ (К·кг)
Удельная теплоемкость воды	$c_{\text{ВОДЫ}}$	4200 Дж/ (К·кг)
КПД теплообменника	η	0,8
Плотность воздуха	$\rho_{\text{ВОЗД}}$	1,225 кг/м ³
Объемный поток воздуха через теплообменник	$Q_{\text{V.ВОЗД}}$	2500 м ³ /ч (0,7 м ³ /с)
Максимальный массовый поток воды через теплообменник	$Q_{\text{m.ВОДЫ.МАХ}}$	1700 кг/ч (0,5 кг/с)
Максимальная мощность, передаваемая нагревателю	$P_{\text{МАХ}}$	12500 Вт

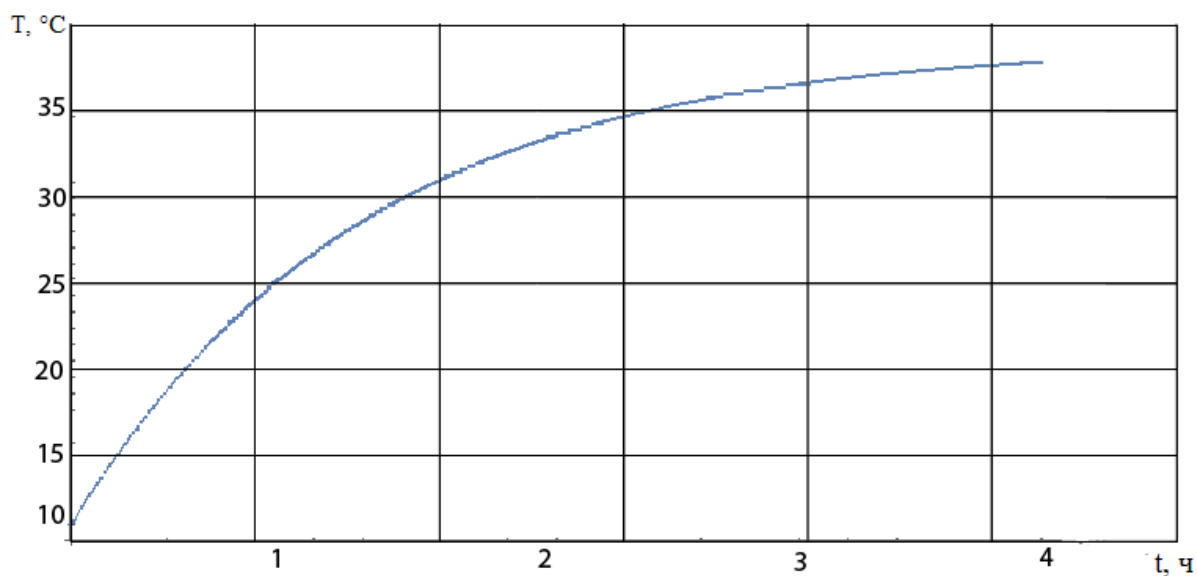


Рисунок 7. – Реакция объекта контроля на нагрев.

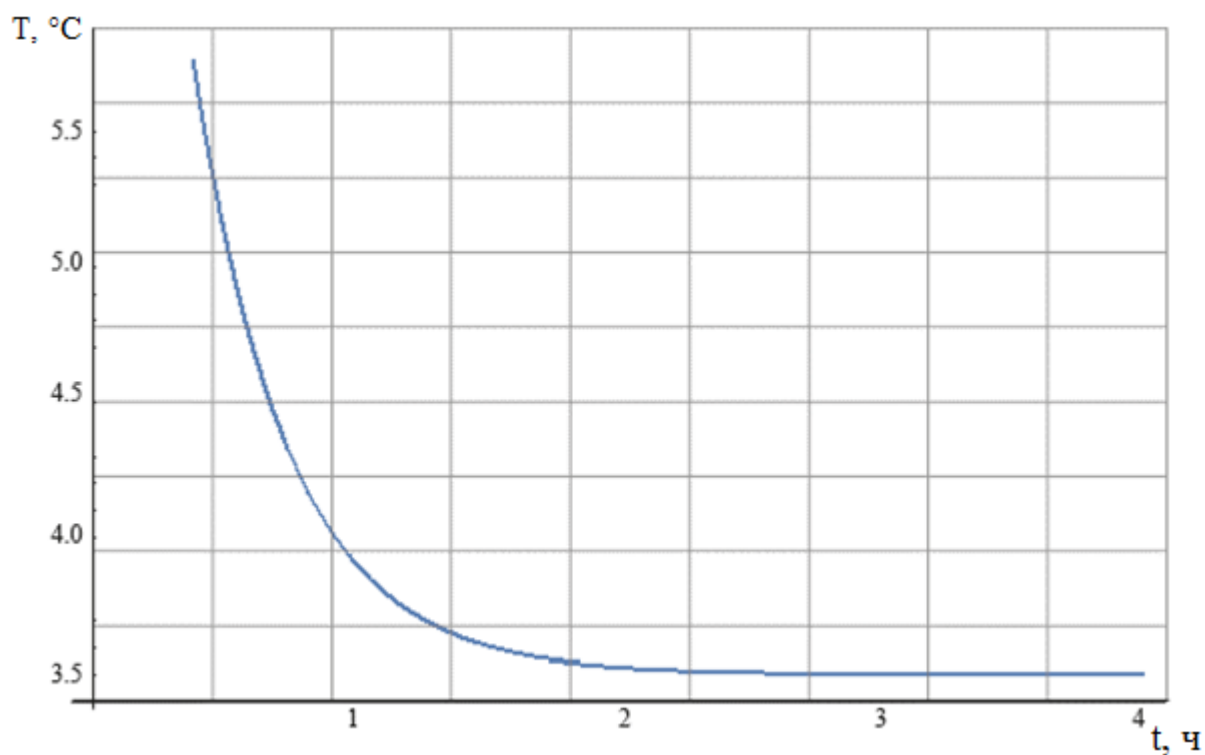


Рисунок 8. – Реакция объекта контроля на охлаждение

На рисунке 9 приведена схема реализации алгоритма на микроконтроллере, который работает в соответствии с методом Эйлера [10].

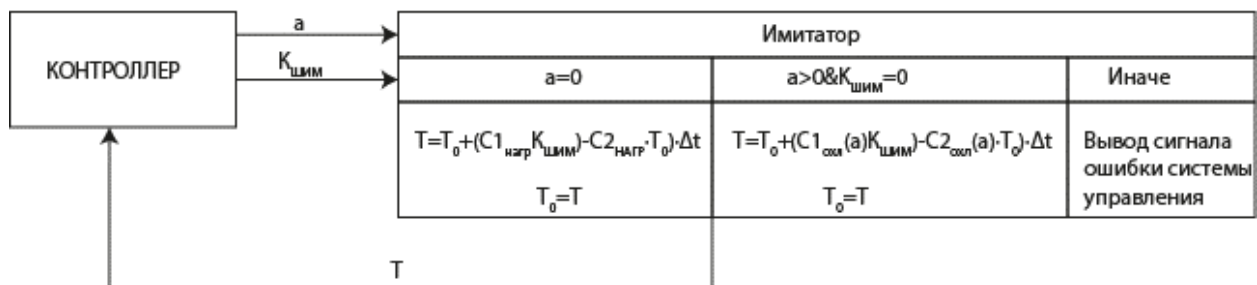


Рисунок 9. – Реализация алгоритма имитации на основе конечно-разностных уравнений.

В вышеприведенной схеме коэффициенты C1 и C2, определяющие свойства охладителя, нагревателя и объекта контроля, задаются программно [11]:

$$C1_{\text{НАГР}} = \frac{K_{\text{ШИМ}} \cdot P_{\text{МАХ}}}{C} + \frac{\chi \cdot S \cdot T_{\text{ВНЕШ}}}{l \cdot C} \quad (29)$$

$$C2_{\text{НАГР}} = \frac{\chi \cdot S}{l \cdot C} \quad (30)$$

$$C1_{\text{ОХЛ}} = \frac{\chi \cdot S \cdot T_{\text{ВНЕШ}}}{l \cdot C} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{ВХОД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot C} \quad (31)$$

$$C2_{\text{ОХЛ}} = \frac{\chi \cdot S}{l \cdot C} + \frac{\eta \cdot \alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} \cdot K_{\text{ВОЗД}}}{(\alpha \cdot K_{\text{ВОДЫ}} + K_{\text{ВОЗД}}) \cdot C} \quad (32)$$

Заключение

В статье рассмотрено устройство имитации объекта управления для автоматизированных систем контроля температуры, приведена математическая модель процессов нагрева и охлаждения изолированного помещения, проведено моделирование температурных воздействий на объект управления, также приведен метод реализации имитации объекта управления на микроконтроллере.

В статье описаны схемотехнические решения, применяемые в исполнительной части, в имитаторе в качестве ЦАП выбран 16-разрядный ЦАП с внешним источником опорного напряжения $U_{\text{ЦАП МАХ}} (2,500 \pm 0,001)$

В. Разработанная схема позволяет имитировать сопротивление датчика ТСП/1 8040 с НСХ 100П соответствующее температурам от $-11,3$ до $50,6$ °С с точностью $\pm(0,26 + 0,002 \cdot t)$, что ниже минимальной погрешности датчика ТСП/1, которая составляет $\pm(0,30 + 0,005 \cdot t)$

Математические модели, рассмотренные в статье, распространяются на большинство автоматизированных систем контроля температуры, так как область их применения типична для подобного рода помещений. Учитывая простоту модели, имитатор имеет высокую скорость вычислений. Также прибор даст возможность отслеживать реакцию системы на динамические изменения ее параметров, таких как:

- температура внешней среды;
- скорость потока воздуха;
- температура охлаждающей жидкости;
- и т.д.

Устройство позволит проводить отладку и проверку автоматизированных систем контроля температуры в лабораторных условиях, что повысит качество разрабатываемых систем контроля температуры.

Список литературы

1 Кривонос В.А., Пирматов Д.С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1754.

2 Кондратьева Н.П., Юран С.И., Владыкин И.Р., Козырева Е.А., Решетникова И.В., Баженов В.А., Литвинова В.М. Инновационные энергосберегающие электроустановки для предприятий АПК Удмуртской

Республики // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1632.

3 Zhang C., Tang P., Cooke N. Human-centered automation for resilient nuclear power plant outage control // Automation in Construction. – 2017. – Vol. 82. – pp. 179-192. в примеры применения систем контроля температуры

4 Shahmehri N., Kamkar M., Fritzon P. Usability criteria for automated debugging systems // Journal of Systems and Software. – 1995. – Vol. 31. – Issue 1. – pp. 55-70.

5 Титце У., Шенк К. // Полупроводниковая схемотехника –12 е изд. Том 1: Пер. с нем. - Москва: ДМК, 2008. – 832 с.

6 Ковшевный А.А., Шестаков А.П., Нужин Е.Е. Имитация объекта контроля для систем управления температурой: сборник докладов. – Екатеринбург [УрФУ], 2016. URL: elar.urfu.ru/bitstream/10995/36263/1/ittsm-2016-40.pdf

7 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Том II: учебник для вузов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. –544 с.

8 Гусак А.А., Гусак Г.М., Бричикова Е.А. // Справочник по высшей математике – Минск: ТетраСистемс, 1999. –640с.

9 Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. – Москва: «Атомиздат», 1976. –1008с.

10 Данилушкин И.А. Аппаратные средства и программное обеспечение систем промышленной автоматизации: учебное пособие. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2007. - 168 с.

11 Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП: учебное пособие. – СПб: СПбГЛТА, 2006. – 152 с.

References

1. Krivonosov V.A, Pirmatov D.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1754.
2. Kondrat'eva N.P., Yuuran S.I., Vladykin I.R., Kozyreva E.A., Reshetnikova I.V., Bazhenov V.A., Litvinova V.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1632.
3. Zhang C., Tang P., Cooke N. Automation in Construction. 2017. Vol. 82. pp. 179-192.
4. Shahmehri N., Kamkar M., Fritzon P. Journal of Systems and Software. 1995. Vol. 31. Issue 1. pp. 55-70.
5. Titce, U., K. Shenk. Poluprovodnikovaya shemotekhnika [Semiconductor circuitry]. 12e izd. Tom 1: Per. s nem. Moskva: DMK, 2008. 832 p.
6. Kovshevnyy A.A., Shestakov A.P., Nuzhin E.E. Sbornik dokladov. Ekaterinburg, UrFU, 2016. URL: elar.urfu.ru/bitstream/10995/36263/1/ittsm-2016-40.pdf
7. Sivuhin D.V. Obshii kurs fiziki. Termodinamika I molekulyarnaya fizika [Thermodynamics and molecular physics]. Tom II: uchebnik dlya vuzov. Moskva: FIZMATLIT, 2005. 544 p.
8. Gusak A.A., Gusak G.M., Brichikova E.A. Spravochnik po vysshey matematike [Handbook of higher mathematics]. Minsk: TeteraSystems. 1999. 640 p.
9. Kikoin I.K. Tablici fizicheskikh velichin [Tables of physical quantities]. Spravochnik. Moskva: Atomizdat, 1976. 1008 p.
10. Danilushkin I.A. Apparatsnye sredstva I programmnoe obespechenie system promyshlennoi avtomatizatsii: uchebnoe posobie [Hardware and software



for industrial automation systems: a tutorial]. Samara: Samar. Gos. tehn. universitet, 2007. 168 p.

11. Vt'yrin V.A. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tehnologicheskimi processami [Automated control systems for technical processes]. Osnovy ASU TP: uchebnoe posobie. Spb: SPbGLTA, 2006. 152 p.