

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРАМИ ПЕЧЕЙ КАПРОЛОНОВОГО УЧАСТКА

Е. С. Кутаева, М. В. Некрасов, М. Ю. Барсукова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Установка предназначена для получения блоков-заготовок капролона (полиамид 6 блочный (капролон В)) из капролоктама методом термической блочной полимеризации. Данный материал используется для изготовления изделий конструкционного и антифрикционного назначения, так как он обладает низким коэффициентом трения, имеет высокую прочность и износостойкость.

Идентификация объекта управления

Для обеспечения устойчивой работы системы автоматического управления (САУ) с удовлетворительными показателями качества управления требуется рассчитать оптимальные значения параметров регулирующего устройства. Для этого, в первую очередь, необходимо определить характеристики объекта управления [1].

Выходная координата $y(t)$ является управляемой величиной объекта управления, рассматриваемого как звено, имеющее также управляющее воздействие $x(t)$, являющееся входной переменной.

Выражение, определяющее зависимость между выходной и входной переменными, является математической моделью объекта [2]:

$$y(t) = F[x(t)] \quad (1)$$

Модель объекта может быть представлена его передаточной функцией:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2)$$

где s – оператор Лапласа, $X(s)$ – изображение входной переменной в операторной форме, $Y(s)$ – изображение выходной координаты в операторной форме.

В данном случае входным воздействием является процент мощности нагревательного элемента. Значение температуры в градусах, получаемое на выходе объекта, является выходной переменной. Кривая разгона представлена на рис. 1.

Таким образом, по экспериментальной кривой, путем вычислений [3], определили, что объект управления может быть описан передаточной функцией:

$$W_0 = \frac{8,16 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\%P} \right] \cdot e^{-3[\text{мин}] \cdot s}}{(182,5[\text{мин}] \cdot s + 1)} \quad (3)$$

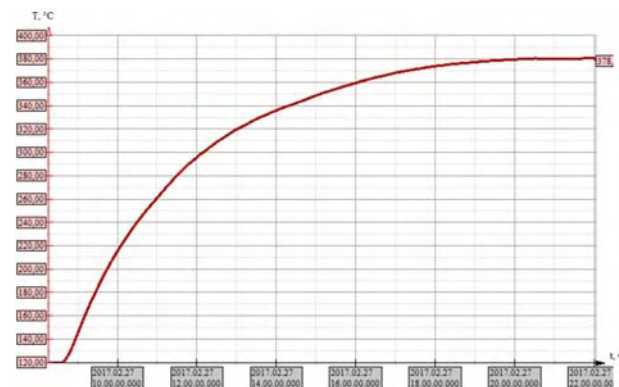


Рис. 1. Кривая разгона

Была проведена оптимизация параметров объекта управления с учетом среднеквадратичной погрешности. Объект управления описывает следующая передаточная функция:

$$W_0 = \frac{8,16 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\%P} \right] \cdot e^{-6[\text{мин}] \cdot s}}{(175[\text{мин}] \cdot s + 1)} \quad (4)$$

Для проверки правильности определения характеристик провели сравнение кривой переходного процесса и кривой, вычисленной в ходе идентификации (рис. 2).

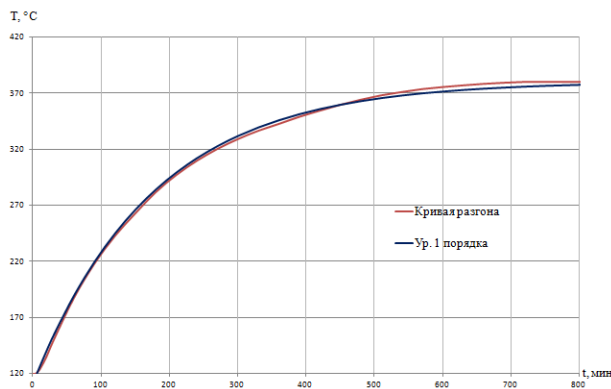


Рис. 2. Сравнение переходного процесса и вычисленной кривой

Функциональная и структурная схемы САУ

Функциональная схема САУ отражает состав системы и характер взаимодействия ее элементов с точки зрения их назначения, т. е. выполняемых функций [4].

Объектом управления является электрический нагреватель, входная координата которого электрическая мощность. Изменение мощности нагрева выполняется при помощи регулирующего органа (РО). Широтно-импульсная модуляция позволяет преобразовать сигнал с контроллера в мощность нагрева ТЭНа. Для контроля температуры печи используется термопара типа ТХК (хромель-копель). Задающее устройство (ЗУ), регулятор, а также формирователь сигнала рассогласования выполнены программно в управляющем контроллере. Функциональная схема САУ представлена на рис. 3.

Для расчета параметров настройки регулятора проектируемой САУ необходимо составление структурной схемы САУ, в которой все функционально необходимые элементы представлены своими передаточными функциями.

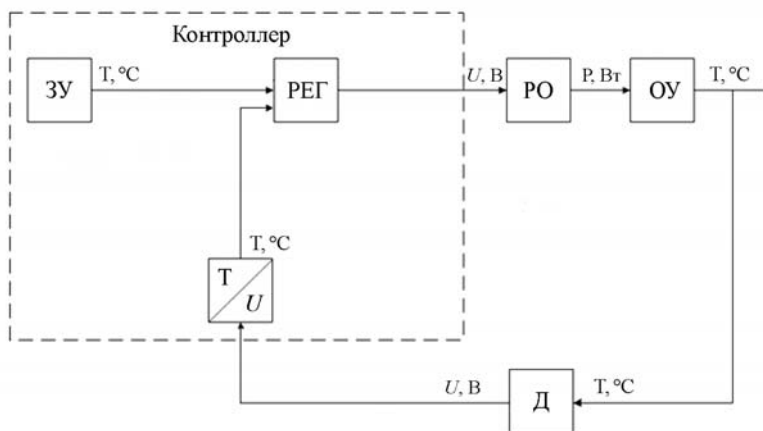


Рис. 3. Функциональная схема САУ

На рис. 4 представлена структурная схема САУ, в которой $G(s)$ – уставка температуры, $E(s)$ – ошибка рассогласования, $U(s)$ – управляющее воздействие, $X(s)$ – выходная величина, $W_{\text{рег}}(s)$ – передаточная функция регулятора, $W_{\text{РО}}(s)$ – передаточная функция регулирующего органа, $W_{\text{ДТ}}(s)$ – передаточная функция датчика температуры, $W_{\text{об}}^U(s)$ – передаточная функция объекта по управлению.

Объект управления описывается уравнением 1 порядка. Передаточная функция нагревателя имеет вид (5).

При синтезе САУ вводится понятие обобщенного объекта управления (в отличие от технологического объекта управления), который включает в себя технологический объект управления и все остальные функционально-необходимые элементы (исполнительные, измерительные устройства, промежуточные преобразователи и т. д.), кроме управляющего устройства – регулятора. На рис. 5 представлена обобщенная структурная схема САУ.

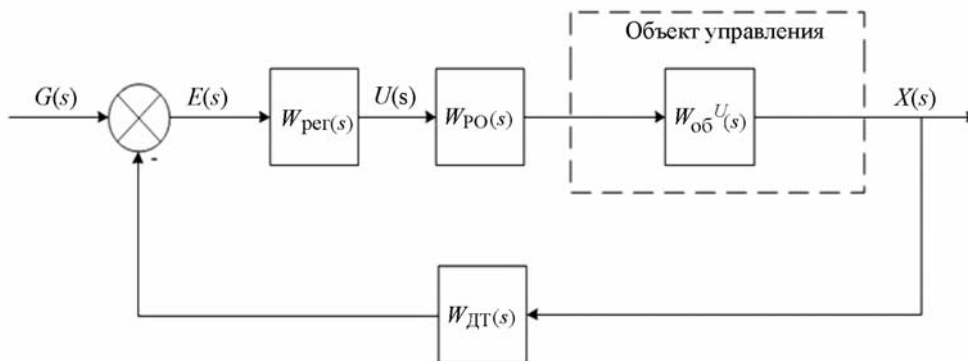


Рис. 4. Структурная схема САУ

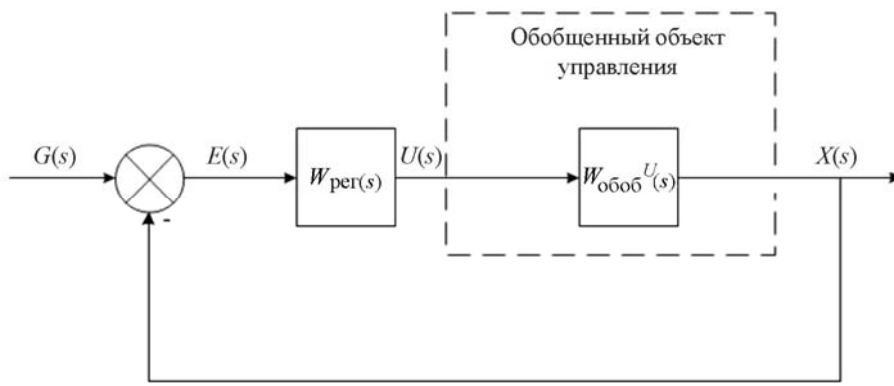


Рис. 5. Обобщенная структурная схема САУ

Объект управления описывается уравнением 1 порядка. Передаточная функция имеет вид:

$$W_{Обоб}^U(s) = W_{Об}^U(s) \cdot W_{РО}^U(s) \cdot W_{ДТ}^U(s) = \frac{K_{Об} \cdot K_{РО} \cdot K_{ДТ} \cdot e^{-\tau_0 s}}{T_0 s + 1} \quad (5)$$

$$W_{Обоб}^U(s) = \frac{6,42 \cdot e^{-6s}}{175s + 1} \quad (6)$$

Расчет параметров настройки регулятора

В качестве регулятора выбирается один из типовых регуляторов, И, П, ПИ или ПИД. Наилучшие показатели качества регулирования, в данном случае, дает применение ПИ-регуляторов. Данный тип регуляторов подходит для одноемкостного объекта с запаздыванием.

Уравнение ПИ-регулятора:

$$y(t) = K_R \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \right] \quad (7)$$

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{ПИ}(s) = K_R \frac{T_i s + 1}{T_i s} \quad (8)$$

Для расчета параметров настройки регулятора вводятся обозначения:

– $T = \frac{T_{обоб}}{\tau}$ – относительная постоянная времени,

– $I = \frac{T_i}{\tau}$ – относительное время изодрома (время

интегрирования),

– $K = K_R K_{обоб}$ – коэффициент усиления разомкнутой системы.

Расчет производится по методу, основанному на критерии оптимального модуля [1]:

$$K = \frac{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}{4(3T^2 + 3T + 1)} \quad (9)$$

$$\frac{1}{I} = \frac{6T^2 + 6T + 3}{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1} \quad (10)$$

Параметры ПИ-регулятора: $K_R = 2,27$; $T_i = 175$.

Цифровые системы управления

Для моделирования и управления с использованием управляющих вычислительных машин (УВМ) необходимо применять специальные цифровые методы, основанные на дискретном представлении непрерывных функций и рекуррентных соотношениях, позволяющих производить вычисления управляющих воздействий в реальном масштабе времени. Рекуррентные соотношения позволяют упрощать вычисление последовательности значений, где каждое новое текущее значение функции вычисляется на базе текущего и предыдущих значений аргумента и предыдущих значений функции.

Преобразование сигналов – это термин, который применяется в теории дискретных систем и относится к преобразованию сигнала из дискретного вида в непрерывный. Данное преобразование необходимо для описания предположения (экстраполяции) о поведении непрерывного сигнала представленного дискретной последовательностью в промежутках между моментами дискретизации, когда его значение неизвестно. Практическая реализация преобразователей дискретных сигналов приводит к новым непрерывным сигналам, которые отличаются от исходных, но в то же время достаточно близки к ним по своим параметрам для решения большинства инженерных задач. Структурная схема процесса с использованием экстраполятора представлена на рис. 6.



Рис. 6. Структурная схема с экстраполятором

Цифровое представление ПИ-регулятора

Рекуррентное соотношение, описывающее регулятор, имеет вид:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) + \dots + q_v e(k-v) \quad (11)$$

Для аналоговой функции рекуррентное соотношение рассчитывается с помощью метода дискретно-аналогового моделирования, используя z -преобразования разных экстраполяторов.

Путем вычислений получено рекуррентное соотношение для ПИ-регулятора с использованием экстраполятора нулевого порядка:

$$u_i = u_{i-1} + k_R (e_i + q_1 e_{i-1}) \quad (12)$$

$$q_1 = \frac{T_o}{T_i} - 1 \quad (13)$$

где, U – управляющее воздействие, e – ошибка согласования, T_o – время цикла объекта, T_i – интегральная составляющая ПИ-регулятора.

Разработка системы автоматического управления (САУ)

Входными сигналами для контроллера ICPCON – i7188EA являются сигналы с термопар типа ТХК, передающиеся через блок АЦП AI-8ТС по интерфейсу RS-485.

На выходе с контроллера формируется сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с амплитудой 220 В, с помощью которого задается мощность нагревательного элемента.

Для получения широтно-импульсного модулированного сигнала заданной величины, необходимо использовать устройство, которое осуществляет гальваническую развязку. Таким устройством является твердотельное реле. Для защиты системы от перегрузки использован предохранитель для цепи переменного тока. Для сигнализации замыкания реле к управляющему контакту подключен трансформатор тока. Для питания схем и устройств необходимо использовать преобразователь сигналов промышленной сети. С этой задачей будет справляться блок питания для получения напряжения плюс 24 В, который подсоединен к сети 220 В 50 Гц. Данное напряжение необходимо для питания микроконтроллера, АЦП и твердотельного реле. Последовательность функциональных процессов представлена на рис. 7.

Назначение программы управления САУ

ПО предназначено для решения следующих задач:

- задачи по контролю температуры объекта управления на входе в систему автоматического регулирования;

- задачи по расчету мощности нагревательного элемента печи и управлению работой цифрового регулятора: включение/отключение твердотельного реле;

- задачи по проверке работоспособности электрических составляющих системы автоматического регулирования температуры.

Программа позволяет выполнить следующие процедуры:

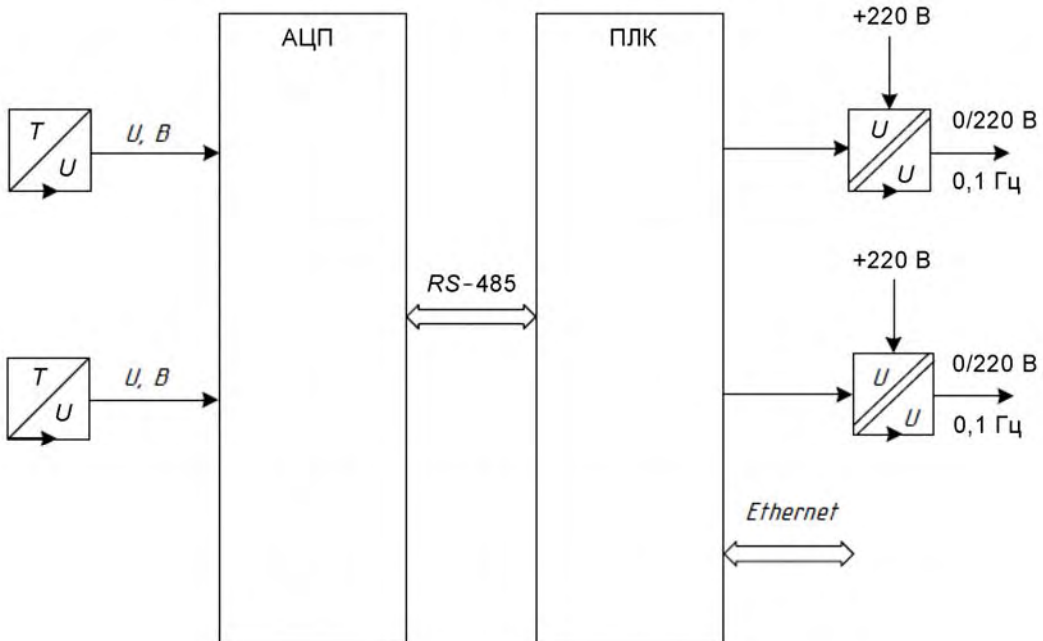


Рис. 7. Схема электрическая функциональная

- задать температуру нагрева, время выдержки и скорость охлаждения печи;
- сформировать сигнал рассогласования между заданной температурой и текущим значением, полученным с термопары;

- осуществить расчет значения управляющего воздействия (мощности);
 - реализовать ШИМ сигнал, управляющий мощностью нагревательного элемента;
- Алгоритм программы управления САУ представлен на рис. 8.

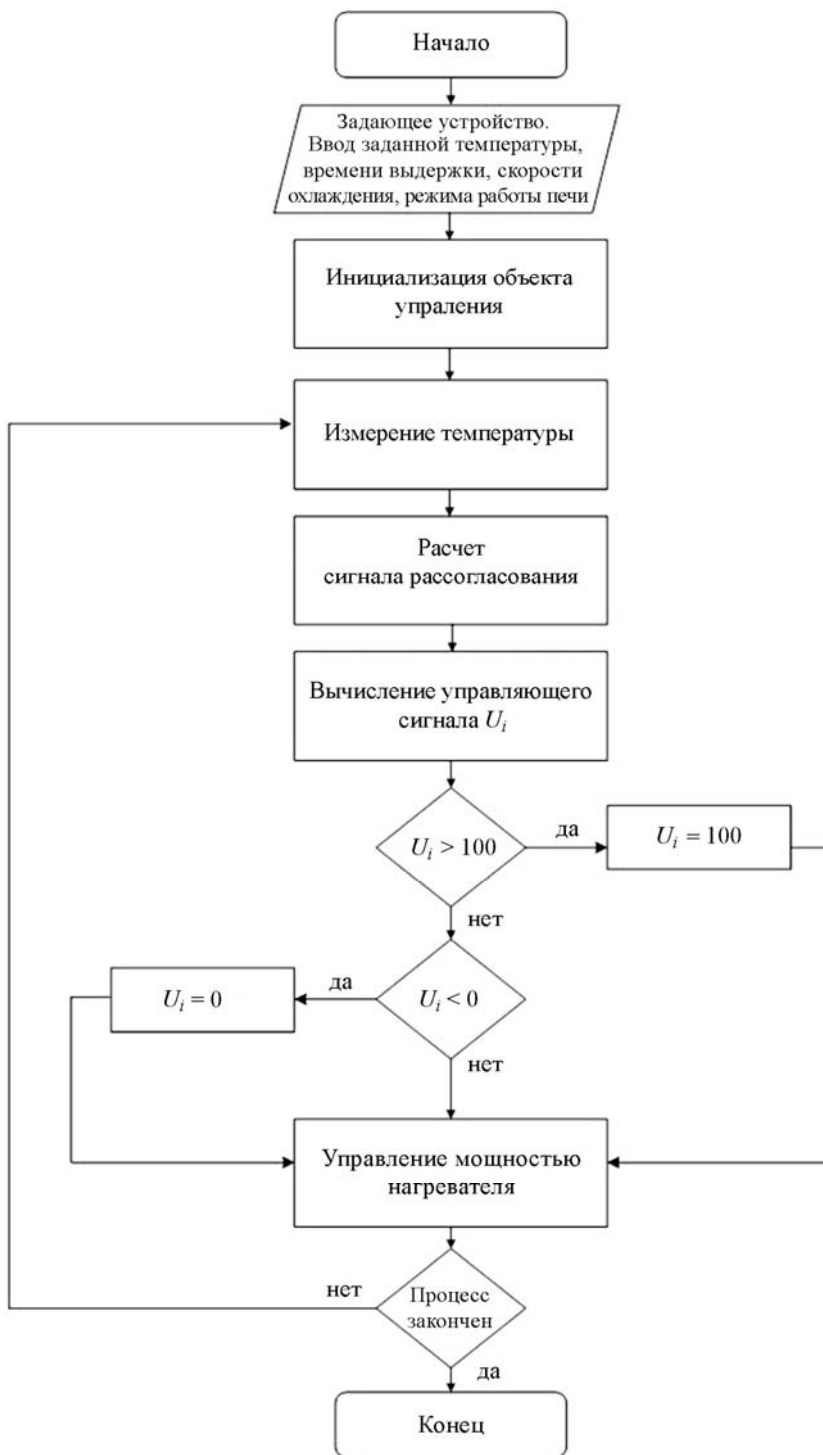


Рис. 8. Алгоритм программы

Разработка интерфейса оператора

Разработанное программное обеспечение состоит из OPC-сервера (объектно-ориентированная программная технология) для опроса конечных устройств и ПО верхнего уровня, написанного с помощью SCADA-системы MasterSCADA. Управление и настройками осуществляется с мнемосхемы программы верхнего уровня (рис. 9). MasterSCADA обеспечивает графическое представление хода выполнения техпроцесса, а также управление техпроцессом с помощью графических средств [5].

Экспериментальное подтверждение работоспособности САУ

По завершению создания программного обеспечения было проведено тестирование, позволяющее проверить адекватность работы системы автоматического регулирования.

Сигнал, поступающий с выхода ПИ-регулятора, должен быть преобразован в сигнал, «понятный» для исполнительного устройства. Релейный выход позволяет использовать соотношение между длительностями включенного и выключенного состояний управляющего выхода, которое меняется пропорционально величине мощности (в процентах), при этом период переключения фиксирован. Для электрических печей с большой инерционностью оптимальная длина импульса ШИМ сигнала составляет от 10 до 30 с. Исходя из этого, время цикла системы совпадает с длиной импульса ШИМ.

Было рассмотрено влияние коэффициентов ПИ-регулятора на показатели качества системы. Требования к управлению печи представлены в табл. 1.

Полученные параметры объекта использовались для расчета параметров настройки регулятора по методу оптимального модуля. Данные параметры регулятора позволили определить область для даль-

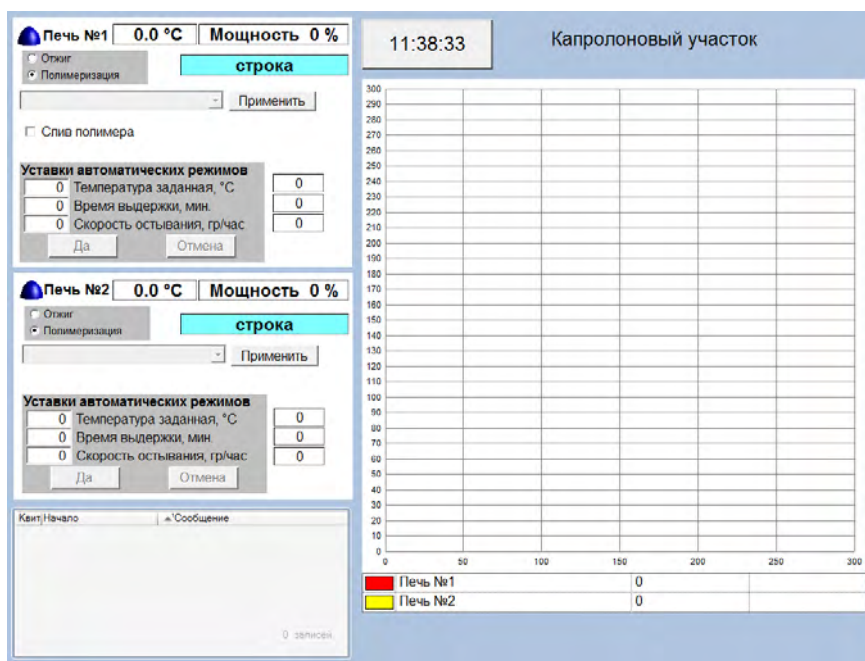


Рис. 9. Интерфейс оператора

Таблица 1

Требования к управлению печи

Для режима полимеризации и отжига	Время регулирования < 90 мин, Отклонение температуры $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$
Для режима остывания	Скорость остывания $\leq 6\text{ }^\circ\text{C/ч}$

Таблица 2

Результаты исследования

	Время регулирования	Перерегулирование
Печь полимеризации $K_R = 1,1$; $T_i = 55$ мин	40 мин	1,3 %
Печь отжига $K_R = 0,935$; $T_i = 64$ мин.	70 мин	1,5 %

нейшей настройки системы регулирования. Для оценки качества системы было определено время регулирования и перерегулирование, значения показаны в табл. 2.

На рис. 10 и рис. 12 отображен полный цикл работы печи полимеризации и отжига, а именно: нагрев, выдержка и остывание. Заданная температура

160 °С для печи полимеризации и 180 °С для печи отжига. Скорость остывания 4 °С/ч. На рис. 11 и рис. 13 представлено изменение мощности нагревательного элемента в процессе работы печи отжига. Температура находится в допустимых пределах требований к управлению печью.

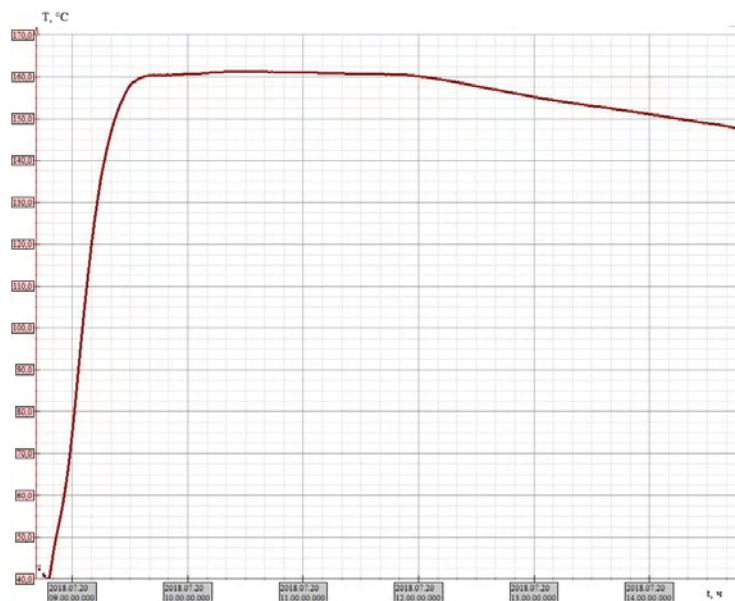


Рис. 10. Переходный процесс печи полимеризации

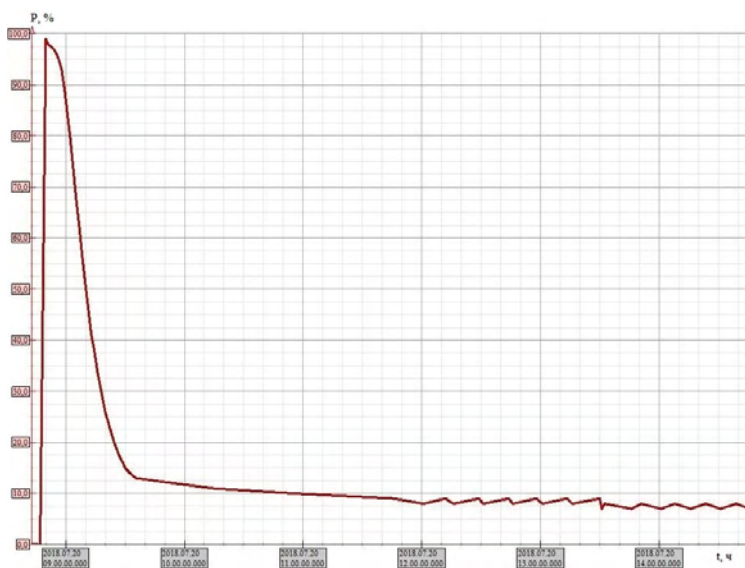


Рис. 11. Изменение мощности печи полимеризации

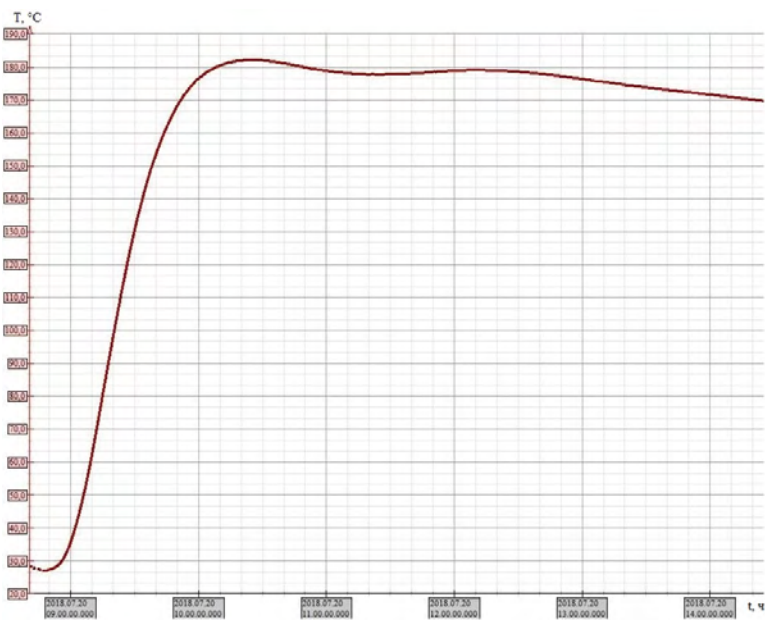


Рис. 12. Переходный процесс печи отжига



Рис. 13. Изменение мощности печи отжига

Литература

1. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974.
2. Расчет автоматических систем / Под ред. Фатеева А. В. М.: Высшая школа, 1973.
3. Дядик В. Ф., Ливенцов С. Н. Руководство по определению характеристик технологических объек-

тов управления и настройке параметров регуляторов. Томск: ТПУ, 2006.

4. Дядик В. Ф., Байдали С. А., Креницын Н. С. Теория автоматического управления: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2011. С. 197.

5. SCADA-система MasterSCADA. [Электронный ресурс]: - Режим доступа: <http://insat.ru/products/?category=9>