

ТИПОВОЕ РЕШЕНИЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

1. Зона обогрева машины литья пластмасс под давлением как объект автоматического регулирования

Для выбора конкретной схемы регулятора необходимо знать характеристики зоны обогрева. Следует отметить, что тепловой баланс при нагреве термопластов и изменении их агрегатного состояния до сих пор мало изучены. Поэтому получение дифференциального уравнения таких объектов представляет значительные трудности. Это связано, в частности, с тем, что по мере пластифицирования материал находится в различных агрегатных состояниях, даже в одной зоне, следовательно, процесс теплообмена между пластмассой и внутренними стенками цилиндра происходит по различным физическим законам. Периодичность вращения червяка ведет к изменению условий пластифицирования (в связи с прекращением выделения тепла от трения при остановке червяка), что также усложняет аналитическое описание объекта регулирования. Теплопередача осуществляется в двух направлениях: по радиусу и по длине инъекционного цилиндра.

Существенные для регулирования объекта свойства можно получить из зависимости (переходной функции) изменения регулируемой величины от времени при единичном входном сигнале. Для тепловых объектов переходной функцией является изменение температуры времени при непрерывном нагреве. После включения нагревателя датчик не фиксирует повышение температуры, и лишь

через некоторое время начинается вначале медленный, а затем более резкий рост температуры (рис.1) Однако подъем кривой постепенно замедляется и при некоторой температуре, повышающей обычные температуры рабочего процесса, устанавливается состояние равновесия, при котором подводимое от нагревателей тепло равно теплу, отводимому излучением, конвекцией и теплопроводностью. Следовательно, температура объекта не повышается.

График усреднённой переходной функции зоны обогрева термопластавтомата.

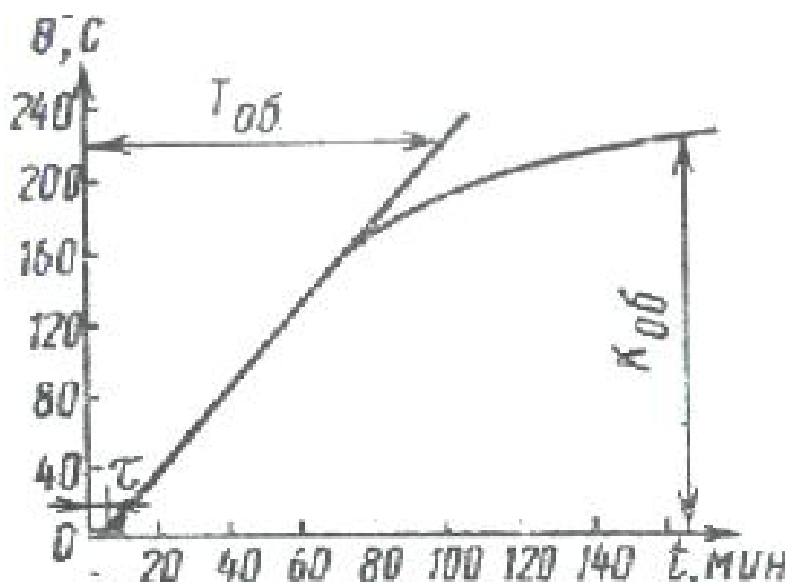


Рис. 1.

Проведя касательные к кривой изменения температуры во времени (см. рис. 1), получают три величины, которыми приблизительно описывается подобная переходная функция:

время запаздывания τ , характеризуемое как время от включения нагрева до точки пересечения касательной к участку кривой соответствующему нарастанию температуры, с осью абсцисс;

постоянная времени $T_{об}$, определяемая как время от точки пересечения касательной к линии нарастания температуры с осью абсцисс до точки пересечения с касательной, проведенной в точке кривой, соответствующей максимальному значению температуры;

коэффициент усиления $K_{\text{об}}$ — максимальное значение температуры, достигаемой на единицу мощности нагревателя.

Значения полученных характеристик зоны обогрева различны в зависимости от конструкции машины. Так, величина $T_{\text{об}}$ зависит прежде всего от массы цилиндра и шнека, а время запаздывания τ — от глубины установки датчика и теплопроводности цилиндра.

Испытания доказали, что эти величины в зависимости от конструкции и размеров машин меняются в следующих пределах: $T_{\text{об}}$ — от 0,5 до 2 час.; τ — в пределах 1,5—6 мин; $\tau/T_{\text{об}}$ — от 0,1 до 0,05.

Следует отметить, что коэффициент усиления объекта $K_{\text{об}}$ и его постоянная времени $T_{\text{об}}$ значительно зависят от производственных условий. Кроме того, недостаточно рассматривать условия в отдельной зоне, не учитывая влияния соседних зон. Требуемый технологический перепад температур по длине цилиндра и весьма различное в разных зонах поглощение тепла материалом обуславливают образование продольных потоков тепла, значительно влияющих на регулирование температуры отдельных зон. Кроме того, изменение теплового равновесия в любой точке цилиндра влияет не только на температуру соответствующей зоны, но также, хотя в замедленной и ослабленной форме, и на условия обогрева соседней зоны. Следует также учесть, что помехи, влияющие на температуру зон могут быть внутренними (исходить от шнека и воздействовать на стенки цилиндра) или внешними (исходить от окружающей среды и воздействовать на поверхность нагрева) или возникать из-за колебаний напряжения сети в различных точках контура регулирования.

Таким образом, анализ физических особенностей процесса литья под давлением и его переходных функций позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемые объекты регулирования относятся к классу объектов с самовыравниванием и характеризуются значительной

величиной «чистого» запаздывания и большой инерционностью. Из-за наличия запаздывания трудно получить высокие показатели точности и динамики регулирования. Это связано в основном с тем, что звено «чистого» запаздывания вносит дополнительный, пропорциональный частоте сети, фазовый сдвиг для каждой точки амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) предельной системы (то есть соответствующей системы без запаздывания), что ведет к снижению запаса ее устойчивости. В связи с этим задача регулирования объектов с запаздыванием усложняется.

Рассмотрение различных аспектов процесса позволяет сделать вывод о том, что при регулировании температуры зон обогрева литьевых машин применяются типовые регуляторы температуры и ряд специальных. Многие иностранные фирмы выпускают специализированные регуляторы для промышленности по переработке пластмасс.

Далее в обзоре даются анализ схем основных применяемых регуляторов температуры и рекомендации по их рациональному использованию.

2. Двухпозиционные регуляторы температуры зоны обогрева

Для регулирования температуры объектов подобного типа благодаря простоте и надежности их конструкции до последнего времени наиболее широко применяли двухпозиционные регуляторы, обеспечивающие только два значения регулирующего воздействия на объект — максимальное и минимальное. Уравнение двухпозиционного регулятора с учетом зоны нечувствительности и коэффициента возврата может быть записано в виде:

$$y = \begin{cases} K_p & \text{при} \begin{cases} x > x_0 \\ x_0 \geq x \geq \lambda x_0 \end{cases} \\ y_1 = K_p \\ O & \text{при} \begin{cases} \lambda x_0 \leq x \leq x_0 \\ 0 < x < \lambda x_0 \\ x < 0 \end{cases} \\ y_1 = 0 \end{cases}$$

где x_0 — зона нечувствительности, выраженная в единицах регулируемой величины;

λ — коэффициент возврата, $0 < \lambda < 1$;

x — отклонение действительного значения регулируемой величины от заданной;

K_p — амплитуда сигнала на выходе двухпозиционного регулятора;

$y_1 = \{ K_p, 0 \}$ — значение управляющего воздействия после последнего переключения.

Структурно-функциональная схема установки представлена на рисунке 2. В её состав входят:

- датчик температуры;
- релейный исполнительный механизм типа двухпозиционного реле, контакты которого обеспечивают включение или отключение нагревателя;

Структурная схема установки нагрева пластмасс с двухпозиционным регулятором

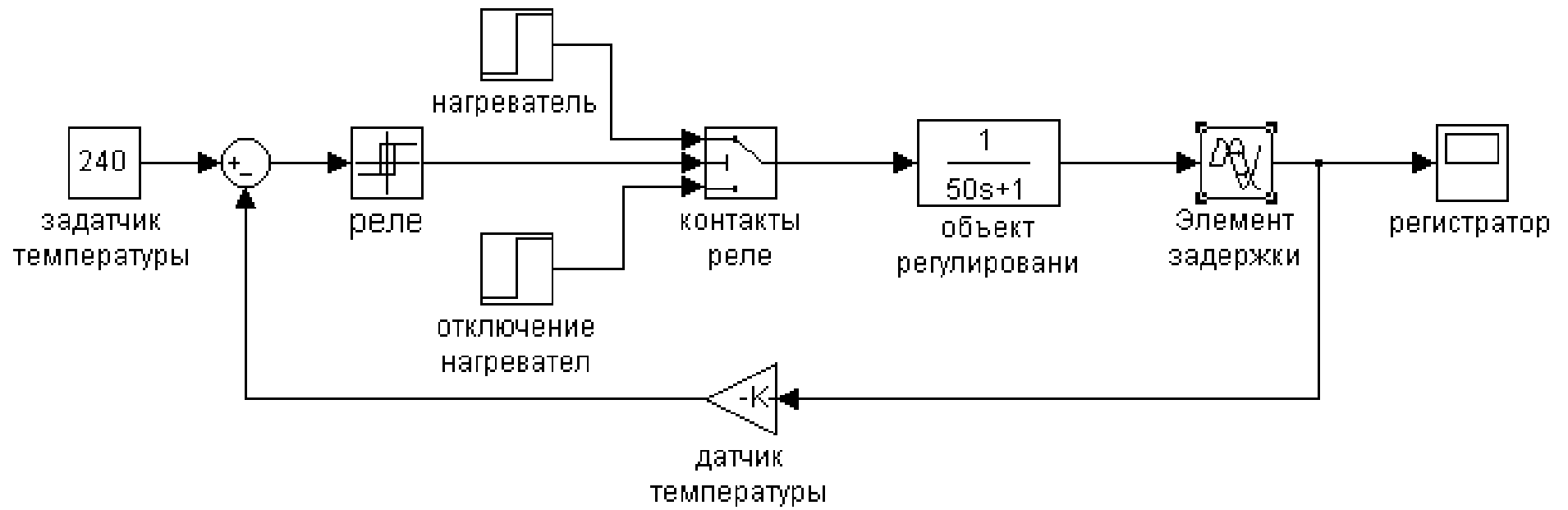


Рис. 2.

Переходной процесс установки с двухпозиционным регулятором

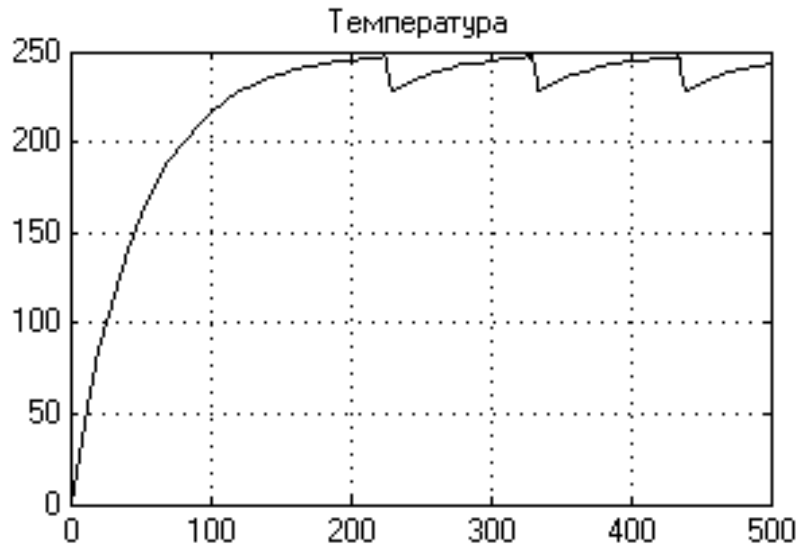


Рис. 3.

Разброс температуры относительно заданной

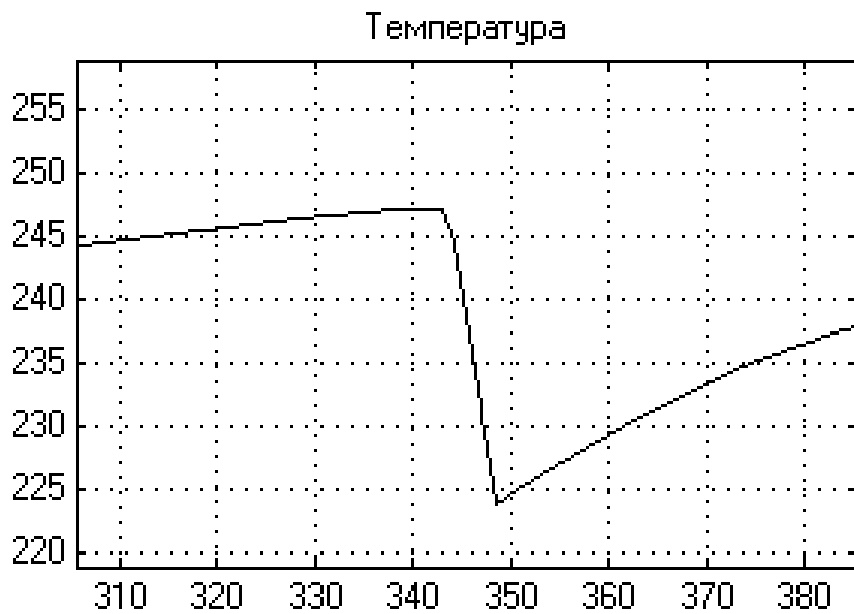


Рис. 4.

- объект регулирования с передаточной функцией $W_0 = \frac{e^{-\tau p}}{T_0 p + 1}$;
- регистратор переходных процессов;
- датчик обратной связи.

Результаты модулирования системы представлены на рис. 3, 4. Максимальная амплитуда автоколебаний составляет 25°C .

Анализ показателей качества изделий из пластмасс и зависимость этих показателей от температуры позволяет сделать вывод, что с технологической точки зрения такой размах колебаний недопустим и должен составлять не более $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Методы улучшения двухпозиционного регулирования. Известны методы улучшения показателей процесса двухпозиционного регулирования температуры зон обогрева машины для литья пластмасс основаны, прежде всего, на различных способах уменьшения амплитуды автоколебаний. С этой целью выбирается регулятор с возможно меньшей зоной нечувствительности и высоким значением коэффициента возврата.

Однако следует иметь в виду, что при уменьшении амплитуды увеличивается частота колебаний регулируемой величины, что в ряде случаев (например, при наличии в схеме регулятора релейно-контактных элементов) нежелательно. Искусственное увеличение инерционности объекта регулирования замедляет процесс регулирования.

Повысить точность регулирования подобных систем можно также за счёт изменения коэффициента усиления характеризуется меньшими температурными колебаниями, в системе с двухпозиционными регуляторами вводят импульсные дозаторы мощности или автотрансформаторы. Вручную изменяя скважность импульсов в дозаторе $\gamma = \frac{t_u}{T}$ (t_u - длительность импульса, T - период квантования), изменяют среднюю величину проводимой к инжекционному цилиндру мощности, а следовательно, коэффициент усиления объекта.

При высокой квалификации и внимании наладчиков можно снизить амплитуду колебаний регулируемой величины до $\pm 5-7^{\circ}\text{C}$.

Другая возможность снижения амплитуды автоколебаний заключается в уменьшении времени чистого запаздывания объекта, что осуществляется помещением термопары непосредственно у нагревателя. Но при этом резко (до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) возрастает разность между температурой измеренной датчиком, и действительной температуры пластмассы.

Однако во многих случаях конструкция объекта, место установки измерительного преобразователя и величины регулирующего воздействия predeterminedены заранее. При этом необходимо искать другие пути повышения качества процесса регулирования.

График изменения регулируемой величины в двухпозиционной системе регулирования с запаздыванием.

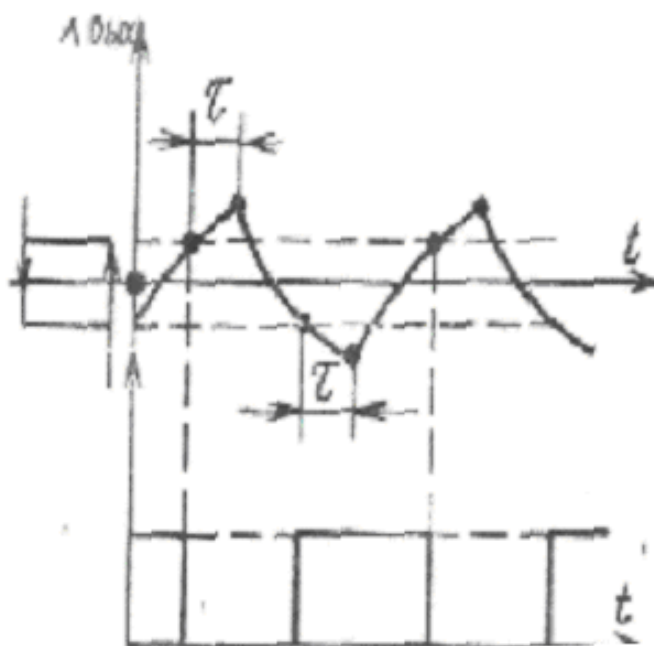


Рис. 5.

Режим изменения регулируемой величины в замкнутой системе с двухпозиционным регулятором — автоколебательный (рис. 5) Амплитуда и частота колебаний являются функциями величины зоны нечувствительности, запаздывания, коэффициента возврата и других параметров объекта. Наличие участка «чистого» запаздывания в пе-

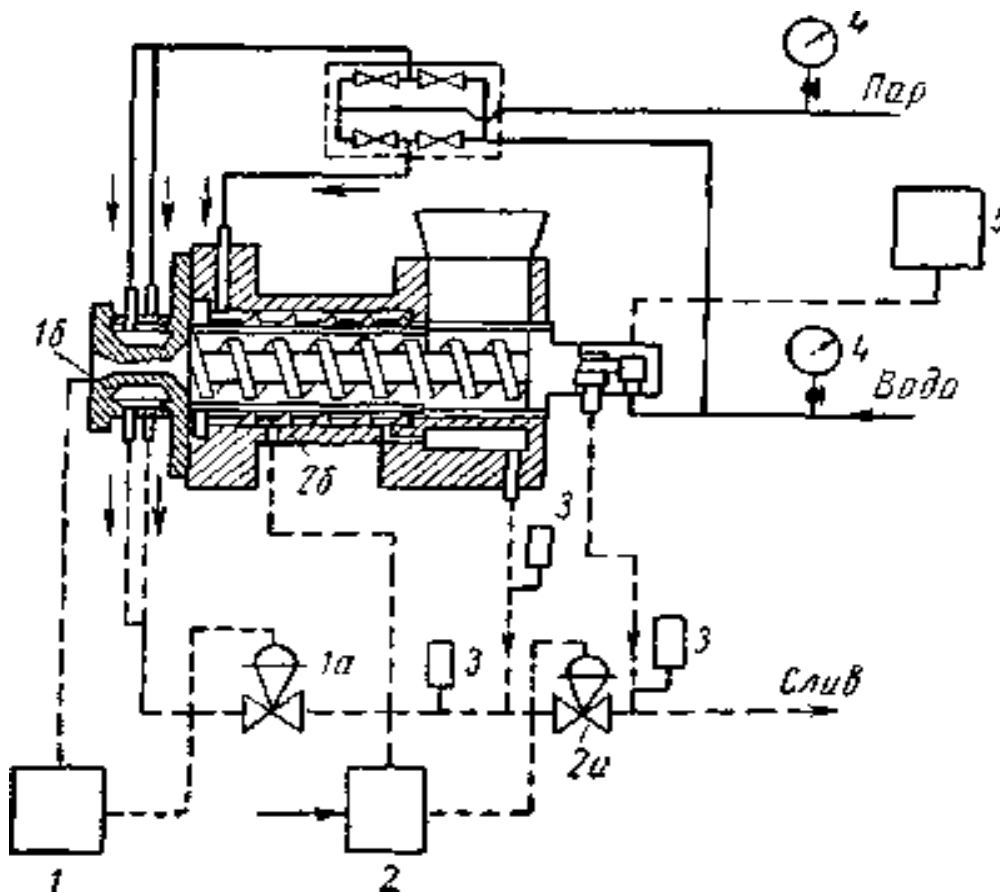
реходной функции объекта регулирования ведет к увеличению амплитуды автоколебаний, так как хотя при достижении регулируемой величиной границы зоны нечувствительности нагреватель включается, температура продолжает снижаться в течение времени запаздывания τ , после чего начинает возрастать.

Аналогично протекает процесс при увеличении температуры выше заданной.

С увеличением относительного запаздывания τ/T_{06} размах колебаний в рассматриваемой системе достигает значительных величин, порядка $\pm 20 - 30^\circ \text{C}$, что с технологической точки зрения недопустимо. Необходимо также учитывать, что в общем случае среднее значение установившихся колебаний не равно заданному, причем отклонения пропорциональны действующим в системе возмущениям.

3. Двухпозиционные регуляторы температуры с обратной связью

Наиболее совершенным средством коррекции при двухпозиционном регулировании является введение местных обратных связей. В этом случае характеристики двухпозиционных регуляторов при соблюдении соответствующих условий приближаются к характеристикам непрерывных систем. Необходимо отметить, что эти регуляторы в последние годы нашли самое широкое применение в промышленной переработке пластмасс.



Блок-схема двухпозиционного регулятора с обратной связью: 1 – усилитель; 2 – релейный регулятор; 3 – объект регулирования; 4 – блок обратной связи 5 – датчик температуры.

Рис. 6.

Блок-схема двухпозиционного регулятора температуры с обратной связью представлена на рис. 6. В зависимости от вида обратной связи регулятор реализует один из типовых линейных законов регулирования: пропорциональном (П), пропорционально-интегральном (ПИ), пропорционально-дифференциальном (ПД), пропорционально-дифференциально-интегральном (ПИД).

В аналитической форме законы регулирования запишутся следующим образом:

$$\text{П-}y=Kx,$$

$$\text{ПИ-}y=K(1+(1/T_{\text{из}} p))x,$$

$$\text{ПД-}y=K(1+T_{\text{д}} p)x,$$

$$\text{ПИД-}y=K(1+ T_{\text{д}} p+(1/T_{\text{из}} p)x,$$

где y — регулирующее воздействие;

x — ошибка регулирования;

$T_{\text{из}}$ — время действия изодрома;

$T_{\text{д}}$ — постоянная времени дифференцирования;

K — коэффициент передачи регулятора;

p — оператор преобразования Лапласа.

Таким образом, в указанных регуляторах обеспечивается пропорциональное изменение в некотором диапазоне выходной координаты в соответствии с изменением входной; пропорционально-интегральное действие регулятора ведет к устранению статической ошибки; пропорционально-дифференциальное позволяет улучшить динамику процесса.

Регулирование величины по квазинепрерывному закону возможно при работе двухпозиционного регулятора с обратной связью в скользящем режиме. При этом регулируемая величина (координата) изменяется по сложному закону: медленно изменяется среднее значение, и одновременно происходят быстрые колебания относительно

этого среднего значения. Условие возникновения скользящего режима в релейной системе сводится к необходимости охвата части системы, включающей релейный элемент, обратной связью; в этом случае скорость изменения сигнала обратной связи в любой момент времени больше скорости изменения внешнего (по отношению к участку, охваченному обратной связью) воздействия.

Соответствующий закон регулирования получается за счет того, что при работе в скользящем режиме передаточная функция линеаризованной системы равна обратной передаточной функции элемента обратной связи, охватывающей реле, характеризующееся бесконечным коэффициентом усиления. Например, для получения ПД-закона регулирования достаточно охватить релейный элемент инерционным звеном. При этом передаточная функция регулятора описывается уравнением:

$$K_{рег}(p) = 1 / (K_1 / (1 + T_1 p)) = 1 / K_1 (1 + T_1 p).$$

Регулирование по ПИД-закону осуществляется путем встречного включения в цепи обратной связи двух инерционных звеньев с различными постоянными времени T_1 и T_2 . В этом случае уравнение передаточной функции имеет вид:

$$K_{рег}(p) = \frac{1}{K_{ос}(p)} = \frac{1}{\frac{K_1}{T_1 p + 1} - \frac{K_1}{T_2 p + 1}} = \frac{1}{K_1} \left(K_0 + T_d p + \frac{1}{T_{из} p} \right),$$

$$K_0 = \frac{T_1 + T_2}{T_2 - T_1}; \quad T_d = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_1}; \quad T_{из} = T_2 - T_1.$$

Если постоянная времени одного из звеньев пренебрежительно мала, то регулирование ведется по ПИ-закону.

$$K_{рег}(p) = \frac{1}{K_1 - \frac{K_1}{1 + T_2 p}} = \frac{1}{K_1} \left(1 + \frac{1}{T_2 p} \right).$$

С целью анализа работы регуляторов с различными законами управления были составлены структурно-функциональные схемы ус-

тановки и промоделированы режимы работы регуляторов при различных значениях параметров настройки регуляторов.

3.1. П-регулятор

Структурно-функциональная схема двухпозиционного регулятора П-типа представлена на рисунке 2.9. Передаточная функция регулятора будет определяться из выражения:

$$W_P = \frac{1}{1 + K_p}.$$

Результаты модулирования предложенной схемы представлены на рисунке 7, 8.

Регуляторы П-типа обеспечивают пропорциональное изменение выходной координаты по аperiodическому закону. Параметры регулирования при оптимальном значении $K_p=28,5$ составляют:

- 1 – время нарастания – 110 мин.;
- 3 – время регулирования – 196 мин.;

Переходной процесс установки с П-регулятором.

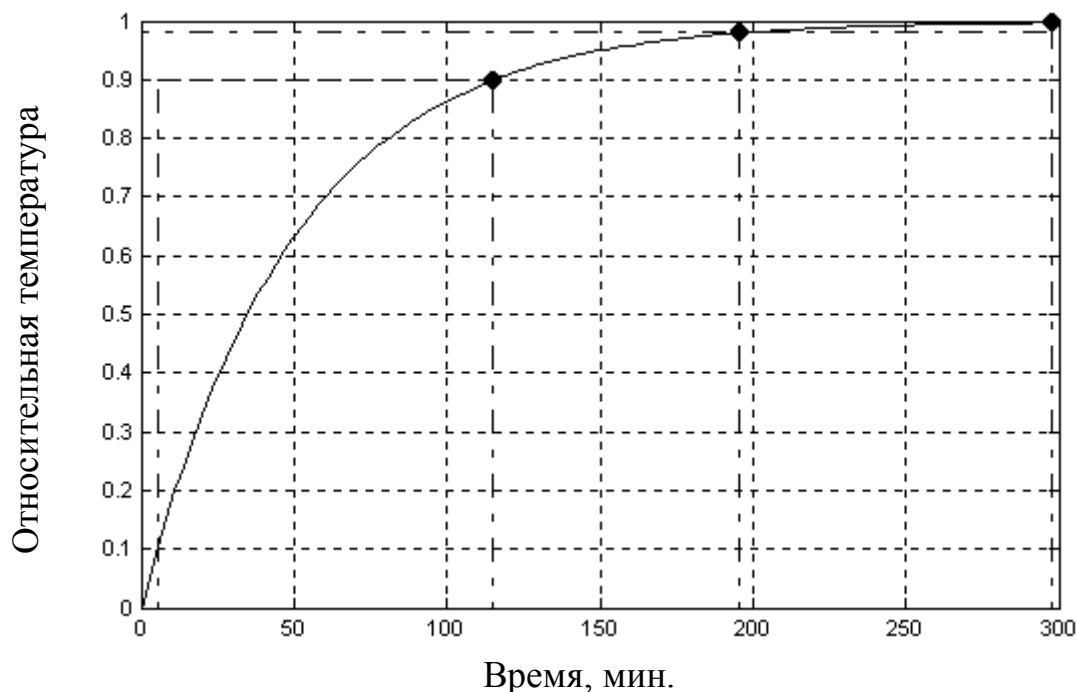


Рис. 7.

АФХ и ФЧХ установки с П-регулятором.

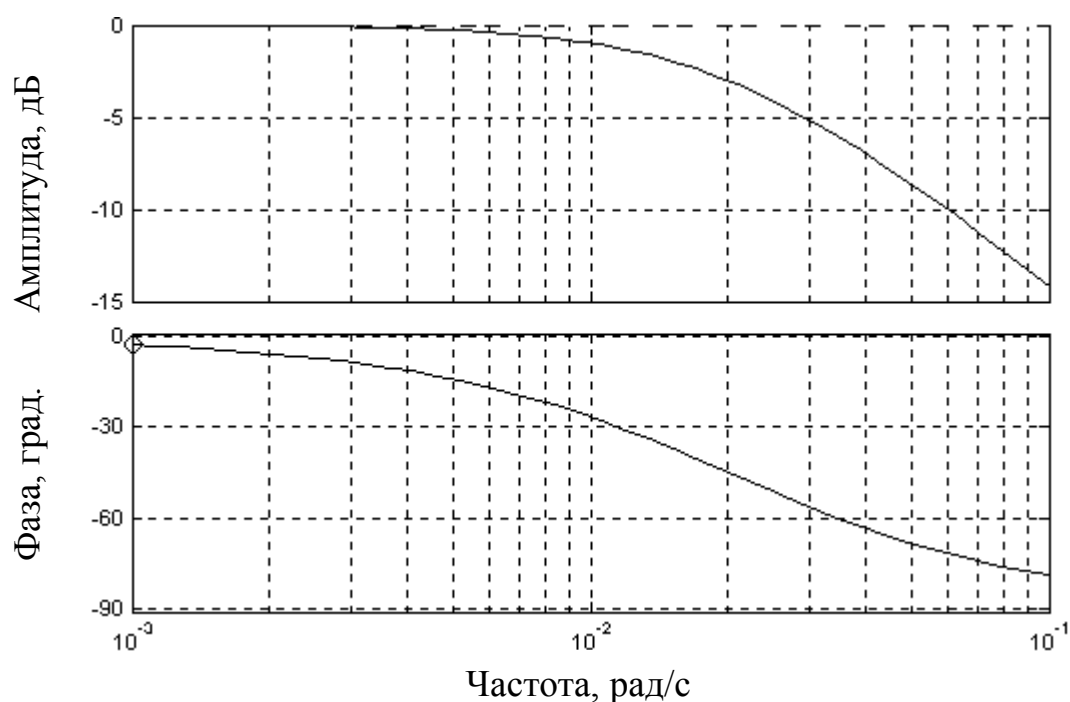


Рис. 8.

3.2. ПИ-регулятор

Структурно-функциональная схема ПИ-регулятора получается путём введения в цепь обратной связи релейного элемента звена с периодичной функцией (см. рис. 2.10).

$$W_P = \left(K_P + \frac{K_i}{P} \right).$$

Для выбора оптимальных значений параметров регулирования K_P и K_i была использована методика настройки с использованием пакета расширения SIMULINK & Nonlinear Control Design.

В модель были введены источник выходного сигнала в виде единичного ступенчатого воздействия и NCD-блок, подключённый к выходу системы.

Нетрудно видеть, что в данном случае контролируемый параметр является реакцией системы на единичный скачок, т.е. переходная характеристика. Настраиваемыми (оптимизируемыми параметрами)

Структуро-функциональная модель с П-регулятором

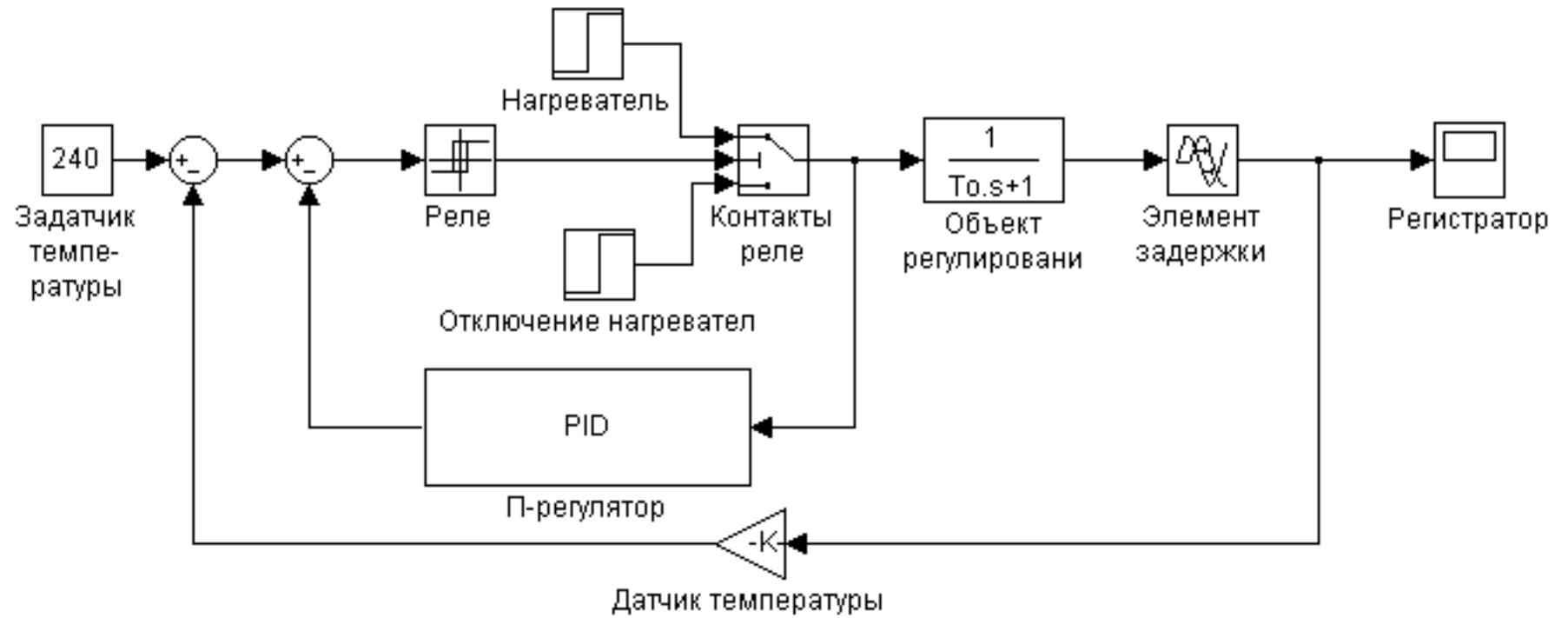


Рис. 9.

Структурная схема установки с ПИ-Регулятором

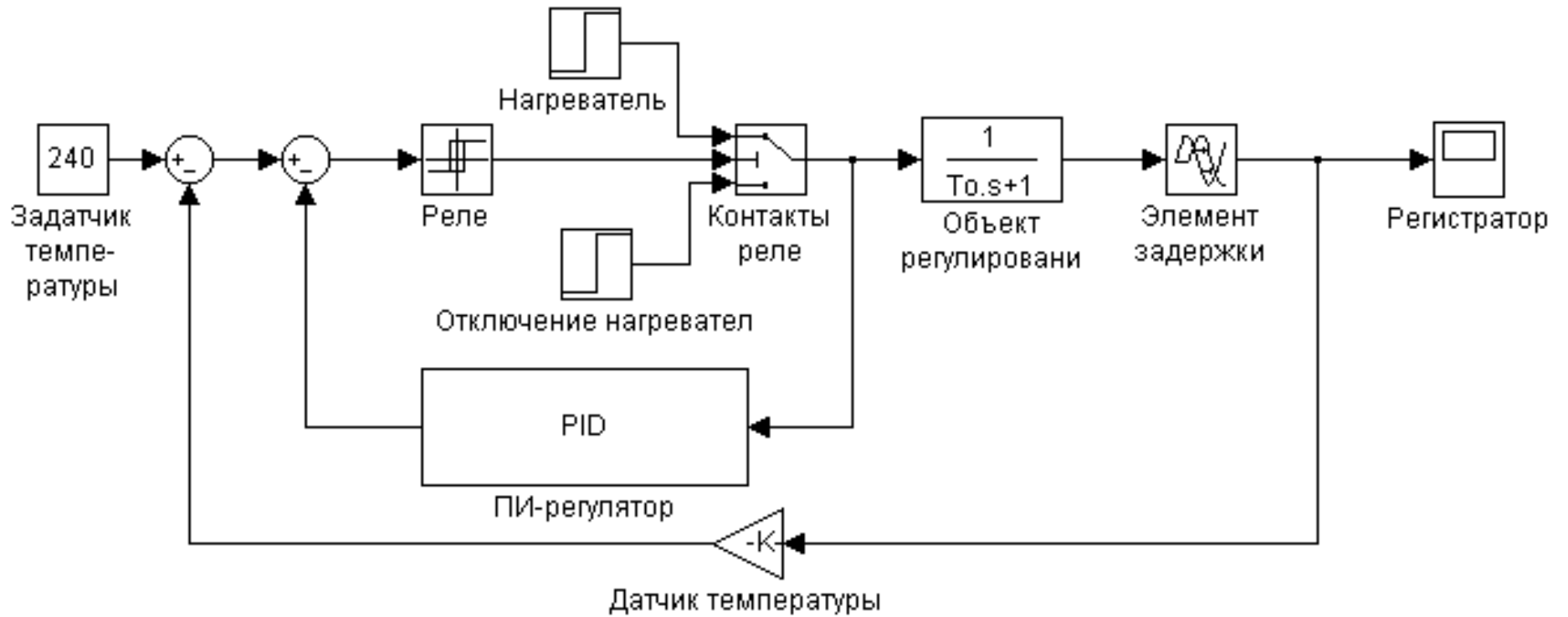


Рис. 10.

является коэффициент усиления K_p и постоянная времени интегрирования K_i .

Ограничения накладываемые на переходные функции формируются следующим образом:

- максимальное перерегулирование – не более 7%;
- время нарастания – не более 10 мин.;
- длительность переходного процесса – не более 150 мин.

Результаты оптимизации параметров K_p и K_i представлены на рисунке 11.

После запуска системы наблюдается переходной процесс 1 с начальным значением K_p и K_i , выбранными из условий технологических ограничений на переходной процесс: $K_{p\text{нач}}=1$ и $K_{i\text{нач}}=0,1$.

В процессе оптимизации параметров NDC-блок пытается «втиснуть» переходной процесс в указанные рамки, выделенные чёрным цветом. В результате оптимизации получается переходной процесс 2, который более детально представлен на рис. 12. Для получения переходных и частотных характеристик процесса была использована инструкция `model linear` пакета SIMULINK, особенно которой является использование относительных величин амплитуды при подаче единичного ступенчатого воздействия.

Результаты оптимизации параметров ПИ-регулятора

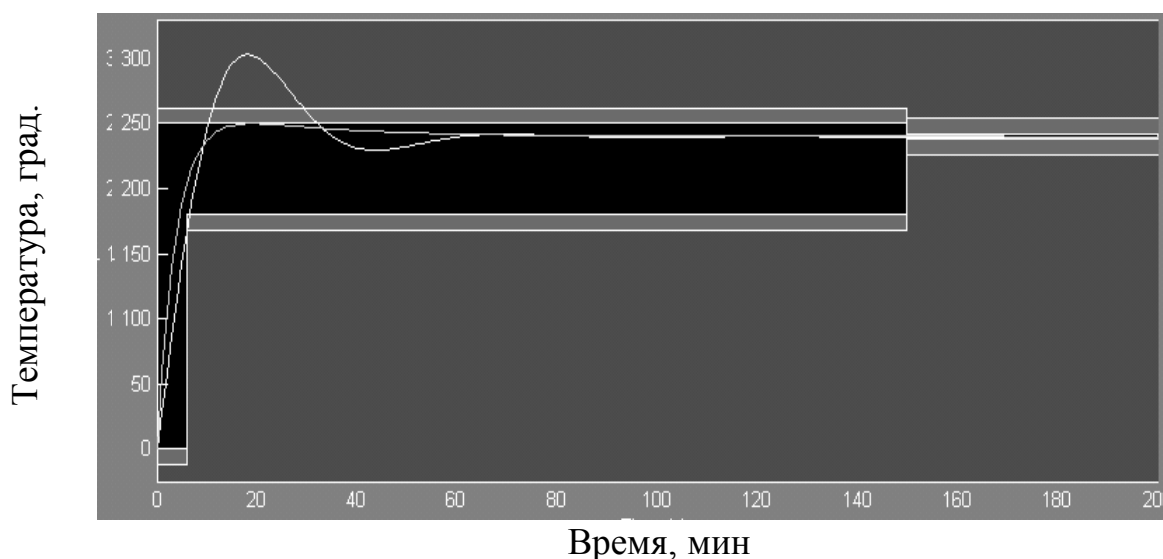


Рис. 2.11.

Переходной процесс регулирования Температуры с ПИ-регулятором

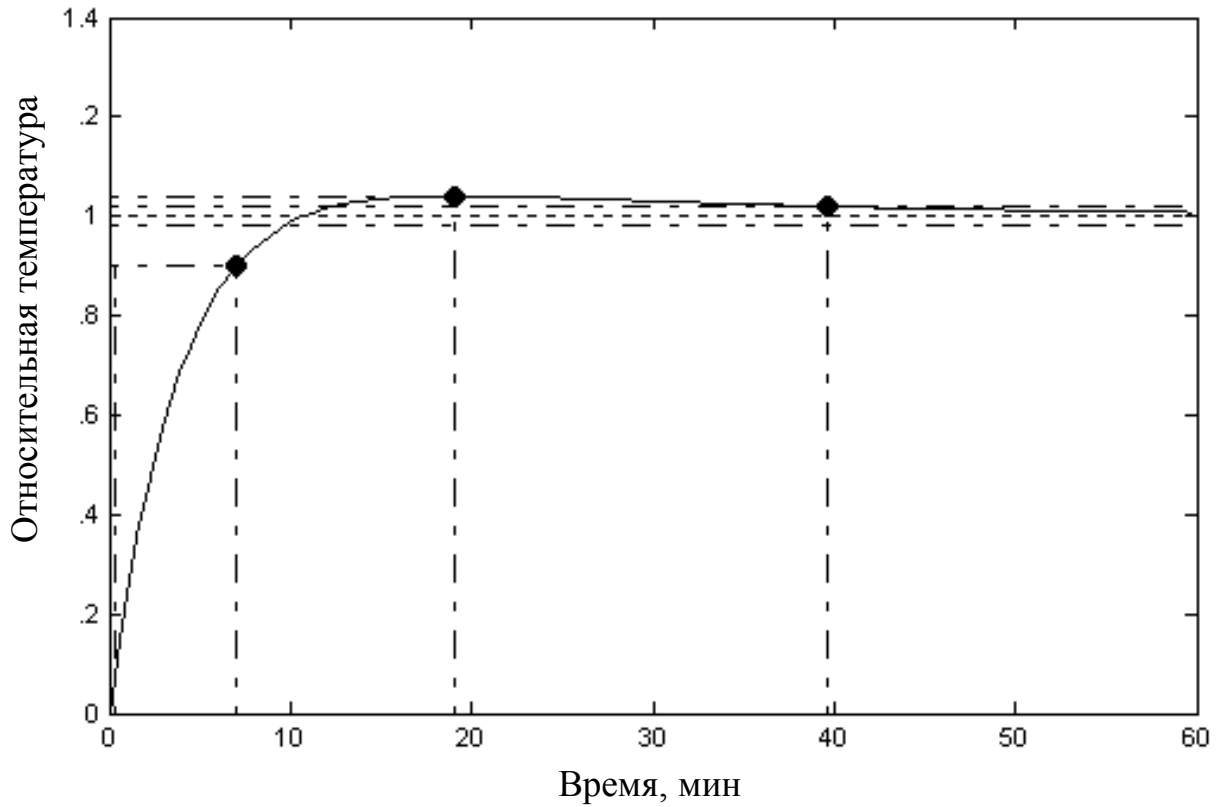


Рис. 11.

АФХ и ФЧХ установки с ПИ-регулятором

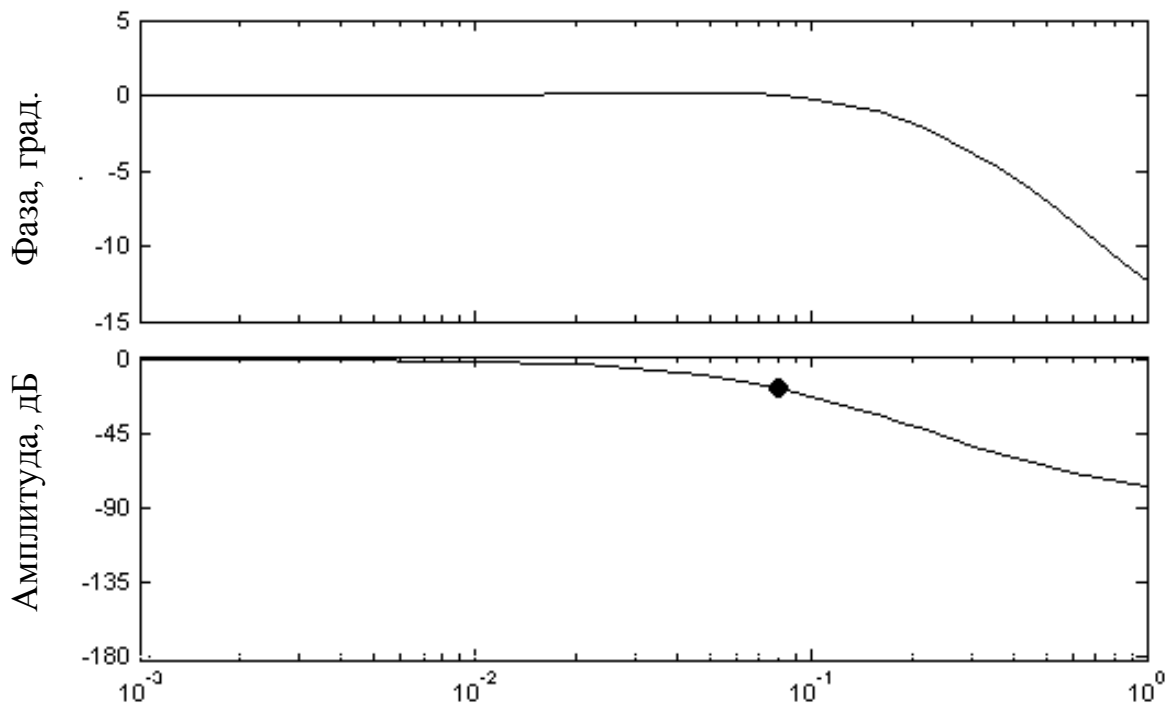


Рис. 12.

Основными показателями переходного процесса явились:

1. время нарастания процесса 7,82 мин.;
2. максимальное перерегулирование 3%;
3. время переходного процесса 39,4 мин.

При этом оптимальное значение настройки явились следующие значения параметров ПИ-регулятора $K_p=12,32$ и $K_i=0,42$ мин.

Устойчивость системы оценивалась по критерию Найквеста. На ФЧХ показан запас устойчивости по фазе, который составил 159° .

3.3. ПИД-регулятор

Регулирование по ПИД-закону осуществляется путём встречного включения в цепи обратной связи двух инерционных звеньев с разными постоянными времени T_1 и T_2 . В этом случае передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_p = \left(K_p + \frac{K_i}{P} + K_d P \right)$$

где $K_p = \frac{T_1 + T_2}{T_2 - T_1}$; $K_i = T_2 - T_1$ и $K_d = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_1}$.

Структурно-функциональная схема установки с ПИД-регулятором в цепи обратной связи релейного элемента представлена на рисунке 2.13.

С целью определения оптимальных значений параметров K_p , K_i , K_d была проведена задача оптимизации в соответствии с методикой настройки ПИД-регуляторов Зингера-Николса.

Суть методики заключается в следующем:

- коэффициенты K_i и K_d устанавливаются равными 0, а коэффициент K_p увеличивается до тех пор, пока система не потеряет устойчивость;
- предельное значение K_p обозначается как K_U , а период автоколебаний – как P_U ;

Структурная схема установки с ПИД-регулятором

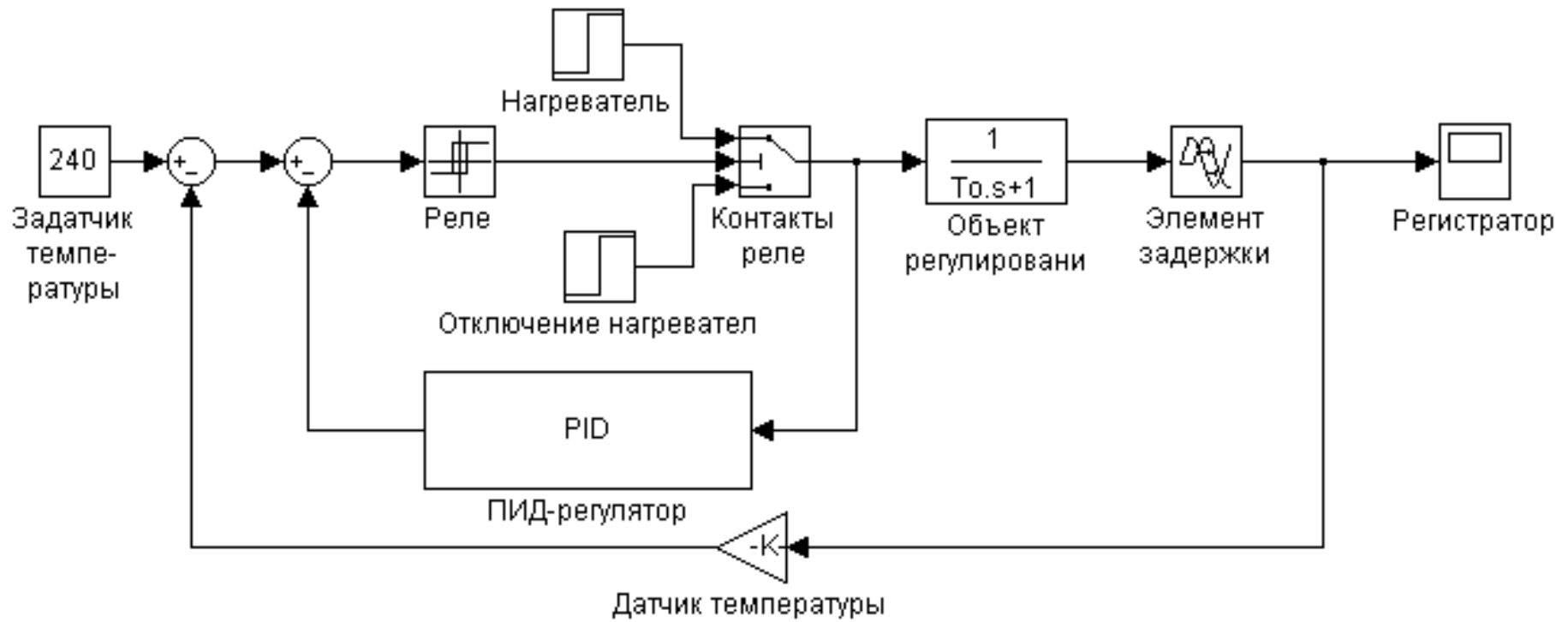


Рис.13.

- задаются следующие значения коэффициентов регулятора:

$$K_p=3K_U/5, K_i=6K_U/(P_U5), K_d=3K_U P_U/40.$$

В соответствии с этой методикой были выбраны следующие начальные значения коэффициентов:

$$K_p=12, K_i=0,5, K_d=0,8.$$

Результаты оптимизации параметров ПИД-регулятора представлены на рисунке 14.

Результаты оптимизации параметров ПИД-регулятора

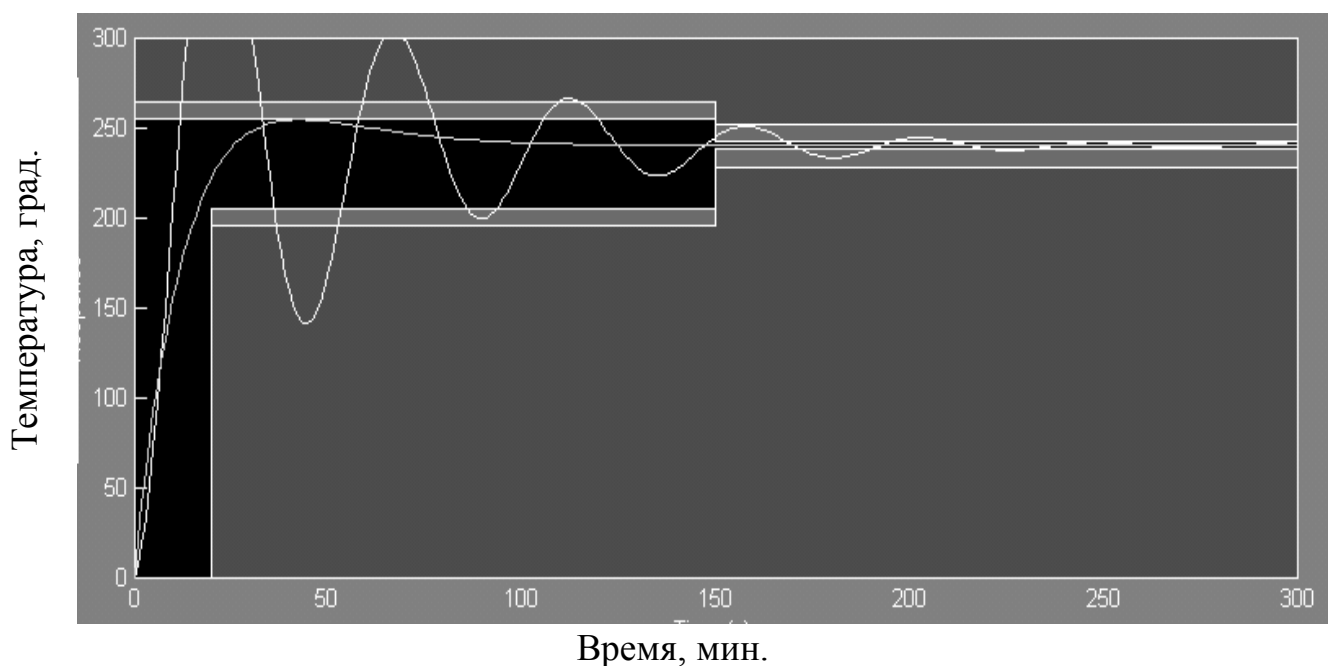


Рис. 14.

После оптимизации параметра переходного процесса, представлены на рис. 15, 16, имеют следующие значения:

1. Время нарастания процесса – 3,85 мин.;
2. Перерегулирование – 6%;
3. Время переходного процесса – 28,2 мин.

При этом значения параметров настройки ПИД – регулятора имели следующие значения:

$$K_p = 23.08, K_i = 1.53, K_d = -3.83.$$

Переходной процесс с ПИД-регулятором

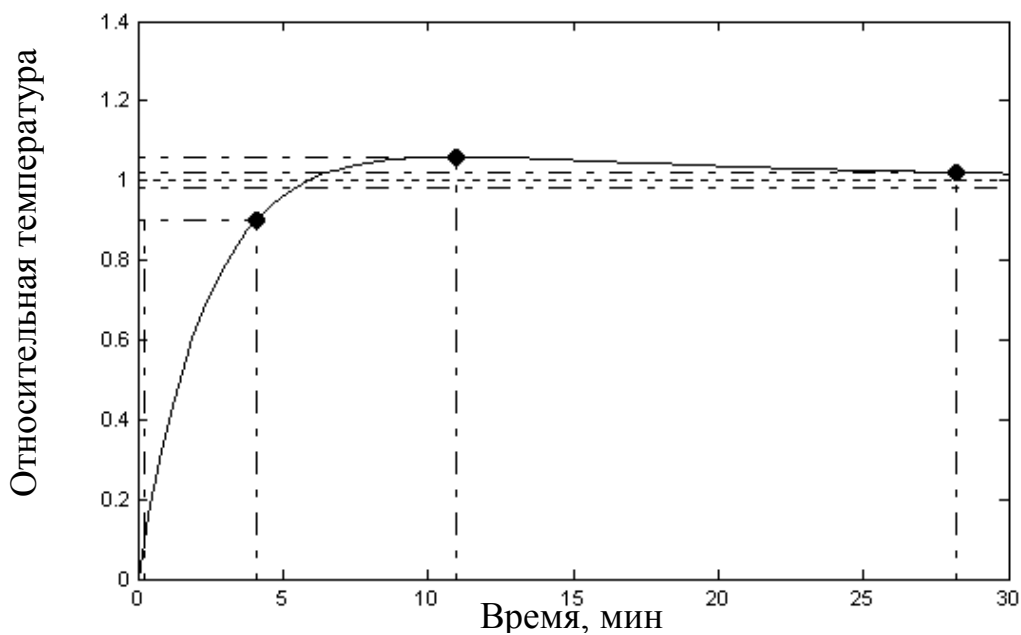


Рис. 15.

АФХ и ФЧХ с ПИД-регулятором

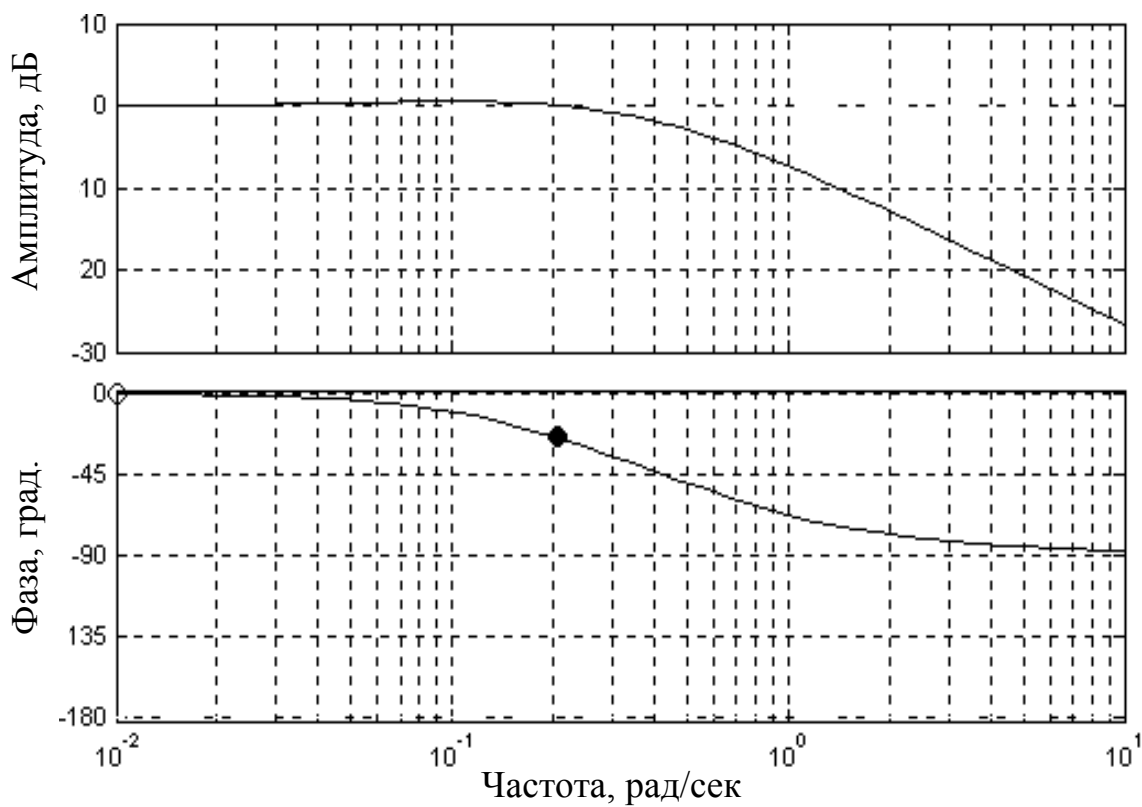


Рис. 16.

Для выбора типа регулятора сведем результаты анализа в таблицу 7.

Таблица 7.

Тип регулятора	Время нарастания, мин.	Перерегулирование, %	Время регулирования, мин.	Запас устойчивости по фазе, град.	Параметры регулятора		
					K_p	K_i	K_d
П-регулятор	110	-	196	180	18,34	-	-
ПИ-регулятор	7,82	3	39,4	159	12,32	0,42	-
ПИД-регулятор	3,85	6	28,2	155	23,08	1,53	-3,83

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о преимуществе ПИД - регулятора по основным показателям регулирования.

Статическую точность системы можно определить из условия:

$$E(p) = \lim_{p \rightarrow 0} w_{зан.}(p).$$

Приведенный анализ статической точности системы для различных видов регуляторов можно сделать вывод, что по этому параметру также ПИД – регулятор имеет преимущество перед другими видами регуляторов.

Точность поддержания температуры составила $\pm 6^0$ С.

При практической реализации схем регулирования в качестве звеньев обратной связи применяют электронные звенья на RC цепях и блоки обратной связи на тепловых элементах, состоящих в общем случае из малоинерционных блоков с нагревателями и электрическими датчиками температуры блока. Нагреватель включается синхронно с включением исполнительного органа. При этом постоянная времени теплового элемента является постоянной времени и для блока обратной связи. Выбором конструкции теплового элемента можно получить соответствующую переходную функцию блока обратной связи, следовательно, и всего регулятора. Блоки обратной связи на тепловых элементах нашли определенное применение в регуляторах приборного и аппаратного типов с входным узлом, выполненным

на магнитном усилителе. Это объясняется простотой и надежностью их конструкции » возможностью работы на низкоомную нагрузку однако трудность перенастройки типовых элементов обратной связи, связанная с необходимостью замены отдельных элементов блоков, существенное запаздывание в переходной функции, зависимость от напряжения питания и сравнительно большой габарит обусловили большее распространение электронных блоков обратной связи.

Электронные блоки, выполненные на RC-цепях, малогабаритны допускают изменение параметров обратной связи в широком диапазоне. Однако недостатком их является сложность получения больших постоянных времени интегрирования и дифференцирования вследствие соизмеримости сопротивлений утечки конденсаторов и входных сопротивлений усилителей с сопротивлением RC-контуров. Максимальное время интегрирования в этих регуляторах ограничено. По тем же причинам в ряде регуляторов ограничено величина $T_d/T_{из} \leq 0,2$.