



РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА

И.А. Давыдов, А.Н. Шельпяков (Воткинский филиал ИжГТУ)

Предложен импульсный энергетический метод, основанный на энергетическом представлении процесса регулирования параметрического состояния объекта. Приведены зависимости для определения величины скважности управляющего сигнала. Предложена методика определения коррекции скважности с использованием элементов нечеткой логики. Разработан алгоритм системы адаптивного регулирования с использованием импульсного энергетического метода с применением элементов нечеткой логики. Представлена программа *Regulator.exe*, позволяющая регулировать выходной параметр объекта в соответствии с разработанным алгоритмом.

Ключевые слова: регулятор температуры, автоматическое регулирование, импульсный энергетический метод.

Процесс регулирования параметрического состояния объекта является энергетическим процессом, в котором поток энергии от системы регулирования поступает на объект, изменяя его энергетическое, а следовательно, и параметрическое состояние [1]. Для регулирования состояния объекта поток управляющей энергии можно организовать либо в виде непрерывного сигнала определенной величины, либо в виде отдельных импульсов постоянной амплитуды, но с переменной скважностью, которая представляется как отношение продолжительности импульсов к периоду следования этих импульсов. В соответствии с энергетическим представлением процесса регулирования можно предположить, что для обеспечения заданного параметрического состояния объекта необходимо на него подавать определенный поток энергии. Математическое и физическое исследование переходных процессов подтверждает линейный характер зависимостей установившегося состояния объекта от величины подаваемой на него энергии.

На рис. 1 представлена зависимость величины установившегося значения выходного сигнала Y от величины потока энергии (мощности) управляющего воздействия. В качестве объекта исследован тепловой объект, выходным сигналом Y которого являлась температура T ($^{\circ}\text{C}$), в качестве управляющего воздейст-

вия применена электрическая энергия в виде непрерывного сигнала определенного напряжения U (В) и тока J (А), подаваемого на нагревательный элемент. Поток управляющей энергии определялся как мощность управляющего сигнала: $P = U \cdot J$ (Вт).

Другим способом формирования управляющего воздействия является ШИМ сигнал. На рис. 2 представлена зависимость величины установившегося значения выходного сигнала Y ($^{\circ}\text{C}$) от величины скважности $S = t_{И}/t_{СЛ}$ управляющего ШИМ сигнала определенной постоянной амплитуды ($U \cdot J$).

Основываясь на энергетическом представлении решения задачи регулирования, предложен импульсный энергетический метод регулирования выходного параметра объекта [2], суть которого состоит в следующем. Первоначально формируется управляющее воздействие в виде импульса максимальной мощности и определенной длительности, обеспечивающее вывод объекта на заданную величину выходного параметра Y_3 за минимальное время. Затем производится формирование управляющих импульсов определенной длительности $t_{И}$ с определенным периодом $t_{СЛ}$ (скважностью $S = t_{И}/t_{СЛ}$) для обеспечения точного выхода объекта на заданную величину выходного параметра Y и поддержания его в этом состоянии. Для реализации предлага-

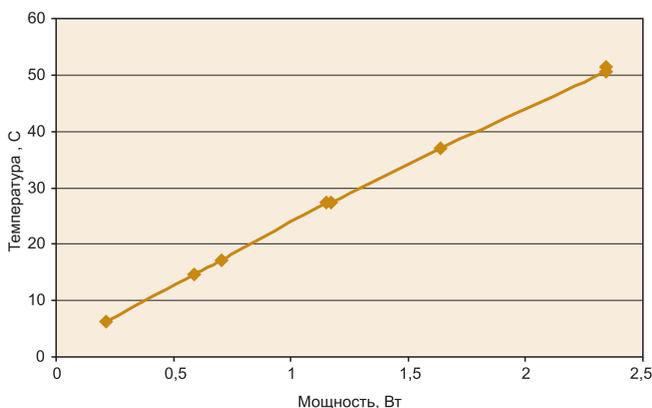


Рис. 1. Зависимость температуры от мощности нагревателя

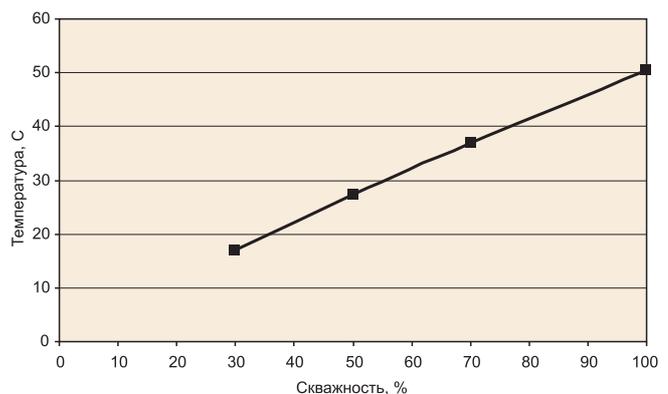


Рис. 2. Зависимость температуры от скважности управляющего воздействия

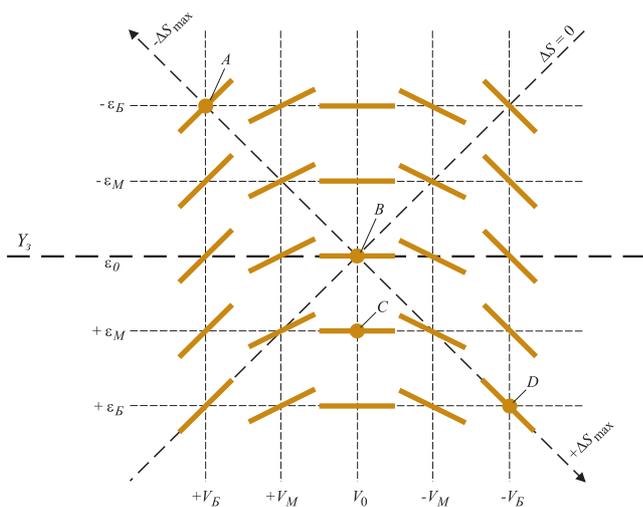


Рис. 3. Диаграмма состояний процесса регулирования

емого метода регулирования необходимо определить два основных управляющих параметра: длительность первого импульса, обеспечивающего перевод объекта в новое заданное состояние и величину скважности S управляющих импульсов для поддержания объекта в этом заданном состоянии.

В работе [3] подробно описан способ формирования первоначального управляющего импульса.

С учетом линейной зависимости (рис. 2) расчетную величину скважности S_p управляющего сигнала, обеспечивающего поддержание объекта на определенном значении Y_3 , можно вычислить по следующей формуле:

$$S_p = (Y_3 - Y_0) / (Y_{MAX} - Y_0), \quad (1)$$

где Y_3 – заданное значение выходного параметра объекта (уставка), Y_{MAX} – приведенное максимальное значение выходного сигнала Y при постоянном непрерывном управляющем воздействии заданной мощности; Y_0 – начальное значение выходного параметра (температура окружающей среды).

Для обеспечения точности в процессе регулирования необходима постоянная корректировка скважности ΔS управляющего сигнала, для чего производится определение текущей скважности по формуле:

$$S = S_p + \Delta S. \quad (2)$$

Величина ΔS может быть определена на основе следующих рассуждений. При регулировании параметра объекта вблизи координаты Y_3 возможны основные ситуации, представленные на рис. 3.

При рассмотрении процесса можно выделить две основные величины: ошибку регулирования $\epsilon = Y_3 - Y$ и скорость V изменения выходного сигнала Y . На рис. 3 средней горизонтальной пунктирной линией показано значение сигнала Y_3 , непрерывными линиями – фрагменты изменения выходного сигнала Y , отражающие различные ситуации сочетаний ошибок ϵ и скоростей V .

Весь диапазон величин можно условно разбить на следующие значения: $+\epsilon_B$ – большое положительное

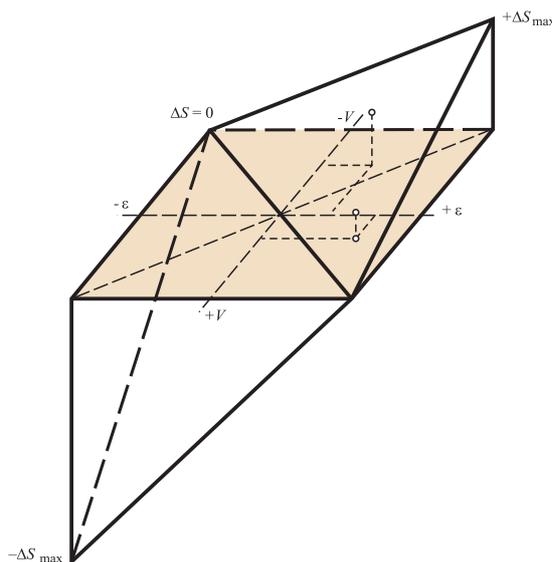


Рис. 4. Пространственная диаграмма зависимости величины корректировки скважности ΔS от величин ϵ и V

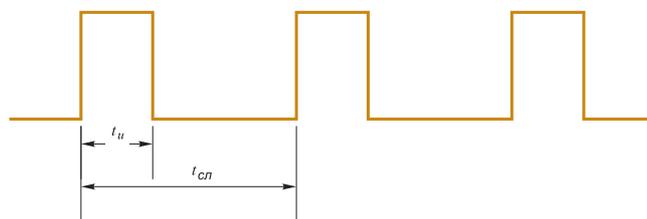


Рис. 5. Определение величин $-\Delta S_{MAX}$ и $+\Delta S_{MAX}$

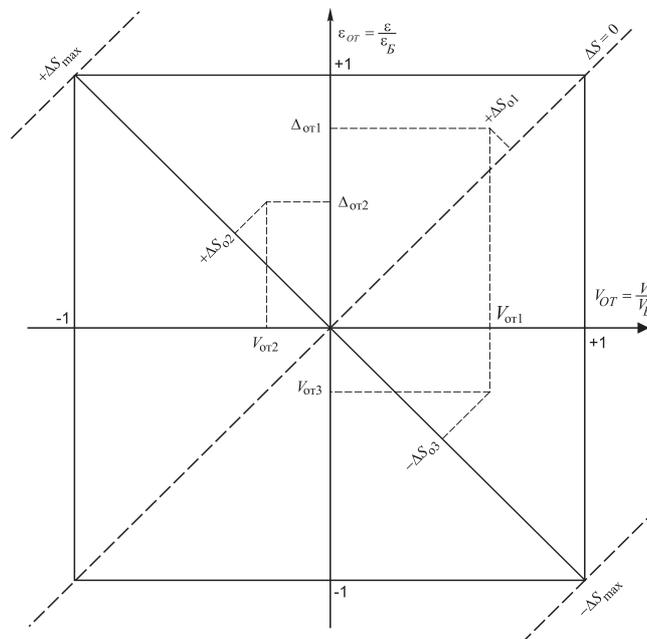


Рис. 6. Диаграмма определения величины коррекции скважности управляющего воздействия

отклонение, $+\epsilon_M$ – малое положительное отклонение, ϵ_0 – нулевое отклонение, $-\epsilon_M$ – малое отрицательное отклонение, $-\epsilon_B$ – большое отрицательное отклонение, а также $+V_B$ – большая положительная скорость, $+V_M$ – малая положительная скорость, V_0 –

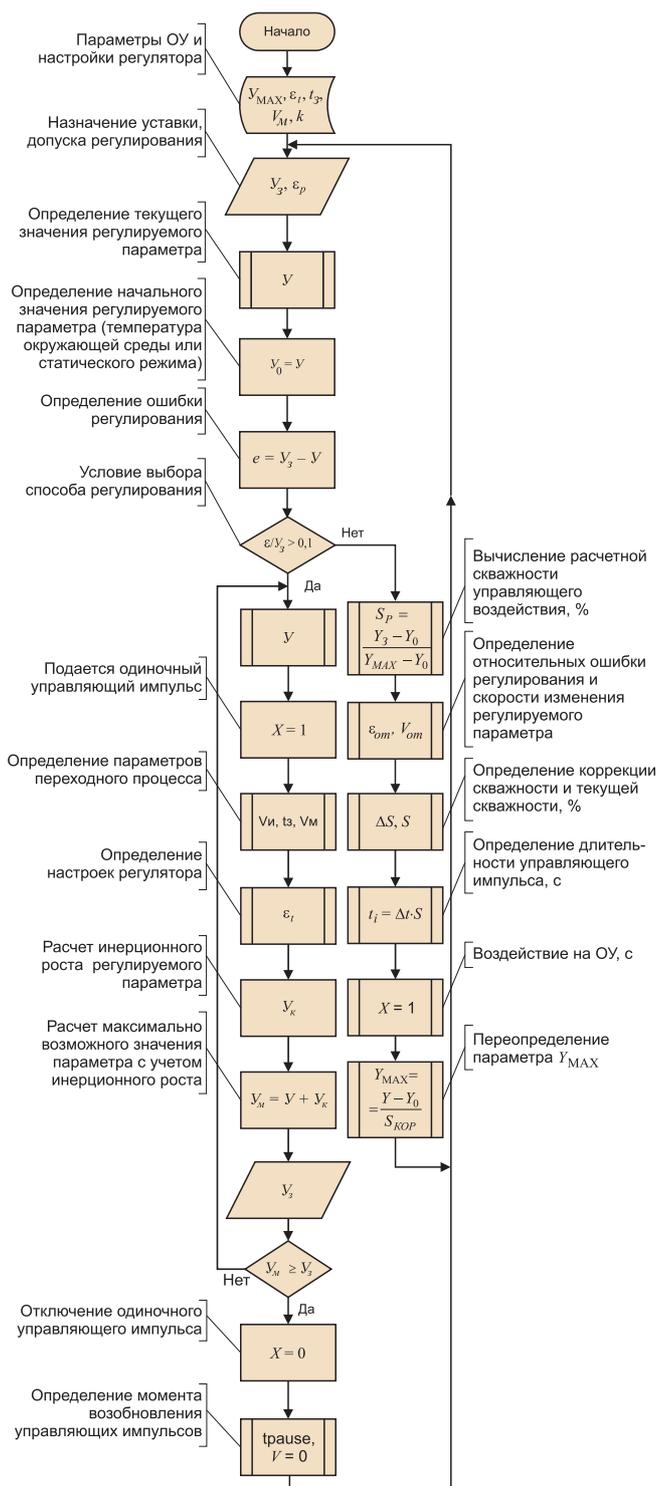


Рис. 7. Алгоритм системы адаптивного регулирования с использованием импульсного энергетического метода с применением элементов нечеткой логики

нулевая скорость, $-V_M$ – малая отрицательная скорость, $-V_B$ – большая отрицательная скорость.

Используя элементы нечеткой логики для указанного пространства величин ϵ и V , можно принять условные значения ΔS . Так, например, для точки А на рис. 3 имеет место большая положительная скорость ($+V_B$) и большая отрицательная ошибка ($-\epsilon_B$), очевидно, что для

данной ситуации величина корректировки ΔS должна быть максимально отрицательной ($-\Delta S_{MAX}$). Для точки В значения ϵ_0 и V_0 , следовательно, величина $\Delta S = 0$; для точки С имеем значения $+\epsilon_M$ и V_0 , здесь необходима средняя положительная величина корректировки ΔS ; для точки D значения $+\epsilon_B$ и $-V_B$, необходима максимальная положительная корректировка $+\Delta S_{MAX}$.

Функциональная связь между величинами ϵ , V и ΔS_{MAX} показана на пространственной диаграмме рис. 4.

Величины $-\Delta S_{MAX}$ и $+\Delta S_{MAX}$ могут быть определены следующим образом. После определения расчетной скважности S_p осуществляется импульсное управляющее воздействие. Формирование импульсов представлено на рис. 5. Тогда величина $+\Delta S_{MAX}$ равна отношению паузы к периоду следования импульсов, или $+\Delta S_{MAX} = 1 - S_p$. А величина $-\Delta S_{MAX} = S_p$.

Для определения значения величины ΔS предлагается следующая методика. Множество значений ϵ и V представляются на диаграмме (рис. 6), позволяющей определять величину коррекции ΔS расчетной скважности S_p по текущему состоянию процесса регулирования, то есть по значениям текущих ошибки регулирования ϵ и скорости V .

Величины ошибки регулирования и скорости изменения температуры приняты относительными и определяются формулами (3) и (4) соответственно, что позволяет системе учитывать текущее энергетическое состояние объекта.

$$\epsilon_{OT} = \epsilon / \epsilon_B, \tag{3}$$

где ϵ_B – значение большого отклонения выходного параметра объекта.

$$V_{OT} = V / V_B, \tag{4}$$

где V_B – значение большой скорости изменения выходного параметра объекта.

Предварительные исследования процессов регулирования позволили определить область значений величин ϵ_B и V_B , затем при определенных значениях ϵ_B и V_B проводилось регулирование параметра Y . При этом определялись показатели качества процесса регулирования: интеграл ошибки регулирования и величина перерегулирования. После определения показателей качества оптимальные значения величин ϵ_B и V_B назначались такими, при которых интегральная ошибка и величина перерегулирования принимали минимальные значения. Значение интегральной ошибки определялось суммой ошибок регулирования ϵ в каждый момент времени по формуле:

$$E_{инт} = \sum_1^t \epsilon dt. \tag{5}$$

Перерегулирование определяется разницей между максимальным значением и уставкой регулируемой величины.

Проведенные исследования показали, что оптимальное значение ϵ_B составляет 1% от максимального значения выходного сигнала Y_{MAX} или $\epsilon_B = 0,01 \cdot Y_{MAX}$.

Оптимальное значение V_B составляет 10% от значения максимальной скорости изменения выходного сигнала V_{MAX} в переходном процессе или $V_B = 0,1 \cdot V_{MAX}$.

После определения значений относительных ошибки и скорости определяется значение приведенной коррекции скважности ΔS_0 по формуле (6):

$$\Delta S_0 = (\varepsilon_{OT} - V_{OT})/2. \quad (6)$$

Величина ΔS_0 позволяет определить коррекцию скважности управляющего сигнала в соответствии с соотношением (7):

$$\begin{cases} \Delta S = \Delta S_0 \cdot (-S_{MAX}), & \text{при } \Delta S_0 < 0, \\ \Delta S = \Delta S_0 \cdot (+S_{MAX}), & \text{при } \Delta S_0 > 0, \\ \Delta S = 0, & \text{при } \Delta S_0 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда скважность управляющего сигнала S определяется по формуле (2). Следует отметить, что при определенных состояниях процесса регулирования модуль коррекции скважности ΔS может принимать значения больше единицы. Тогда скважность управляющего сигнала, определяемая по выражению (2), примет значения $S = 0$ или $S = 1$.

Параметры объекта управления (ОУ) могут изменяться в процессе регулирования. Например, повышение напряжения в сети приведет к повышению максимальной температуры печи, т.е. к увеличению параметра объекта Y_{MAX} , а образование накипи в котле или понижение температуры окружающей среды приведет к снижению значения Y_{MAX} . Поэтому для компенсации изменения параметров ОУ в определенные моменты производится пересчет значения Y_{MAX} .

Переопределение значения параметра Y_{MAX} производится с использованием линейной зависимости регулируемой величины от скважности. Поэтому значение параметра Y_{MAX} определится по формуле:

$$Y_{MAX} = (Y - Y_0)/S + Y_0. \quad (8)$$

После переопределения параметра Y_{MAX} вновь определяется расчетная скважность S_p управляющего сигнала. Затем по текущему состоянию ОУ определяется величина коррекции скважности ΔS и в соответствии значениям S_p и ΔS определяется требуемая скважность управляющего сигнала S , необходимая для поддержания регулируемой величины на требуемом значении уставки регулирования Y_3 .

На основе результатов исследований разработан алгоритм системы адаптивного регулирования (рис. 7) с использованием импульсного энергетического метода с применением элементов нечеткой логики для управления инерционными объектами с запаздыванием.

Разработанный алгоритм позволил создать программу на языке программирования Delphi, результатом которой стало приложение Regulator.exe.

При программном моделировании в качестве инерционного объекта принималась модель апериио-

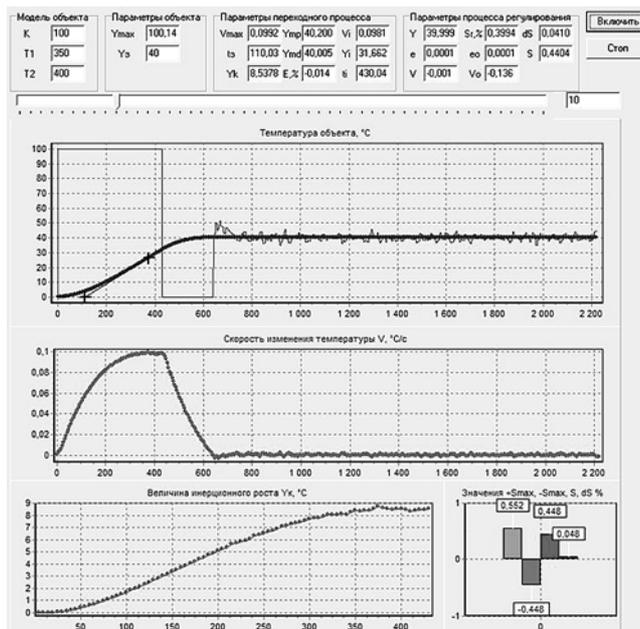


Рис. 8. Интерфейс программы Regulator.exe

дического звена второго порядка [4], реакция которого на единичное ступенчатое воздействие описывается зависимостью:

$$Y(t) = K \cdot [1 - \frac{1}{T_1 - T_2} \cdot (T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}})], \quad (9)$$

где K – коэффициент преобразования (усиления) входного сигнала, равный отношению установившейся регулируемой величины Y_k к величине управляющего импульса X : $k = Y/X$; T_1, T_2 – постоянные времени, характеризующие инерционные свойства ОУ, t – текущее время.

Программа Regulator.exe позволяет регулировать выходной параметр объекта в соответствии с заданной уставкой Y_3 (рис. 8). Верхняя область программы имеет четыре зоны. В первой зоне находятся настройки модели объекта: K, T_1, T_2 . Во второй зоне устанавливаются параметры объекта: приведенное максимальное значение выходного сигнала Y_{MAX} , которое переопределяется (адаптируется) программой, а также уставка регулирования Y_3 . Третья зона отражает параметры переходного процесса: максимальную скорость изменения регулируемого параметра объекта V_{MAX} , инерционное запаздывание t_3 , инерционный рост Y_k , погрешность E выхода регулируемого параметра на уставку, а также значения скорости, регулируемого параметра и времени на момент завершения первого одиночного импульса.

После формирования управляющего импульса на объект управления изменение регулируемого параметра происходит с нарастанием в течение определенного времени. Это время называется запаздыванием реакции объекта, или инерционным запаздыванием t_3 . Инерционное запаздывание зависит от инерции (массы, расстояния от датчика до нагревателя) объекта управления.

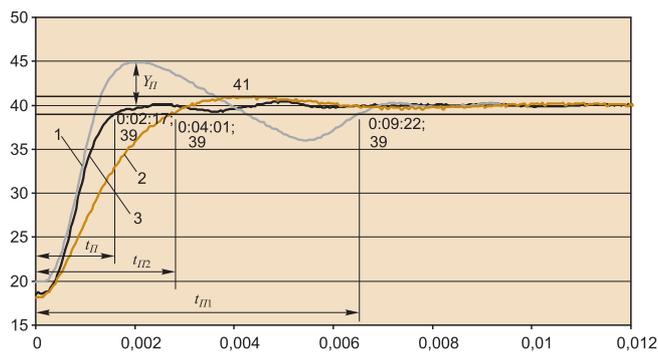


Рис. 9. Сравнительный анализ качественных характеристик переходных процессов

Инерционный рост Y_k возникает вследствие инерционного запаздывания и определяется величиной роста регулируемой величины после отключения первого управляющего импульса.

Четвертая зона содержит текущие параметры процесса регулирования: значение регулируемого параметра Y , ошибку регулирования ε , скорость изменения регулируемого параметра V , значение расчетной скважности S_p , значения относительных величин ошибки регулирования ε_{OT} и скорости изменения регулируемого параметра V_{OT} , значение коррекции скважности ΔS и значение текущей скважности S .

На графике "Температура объекта" отражается изменение значения регулируемого параметра объекта, а также значение текущей скважности.

На следующих графиках представлены скорость изменения температуры, а также величина инерционного роста на момент завершения одиночного импульса.

Последняя диаграмма визуально отражает значения величин, необходимых для определения текущей скважности: $+\Delta S_{MAX}$, $-\Delta S_{MAX}$, S и ΔS .

Аппаратная реализация разработанного алгоритма и программы позволила создать регулятор, способный регулировать температуру физических тепловых объектов с удовлетворительной точностью. Сравнительный анализ качественных характеристик переходных процессов представлен на рис. 9.

Давыдов Иван Александрович — аспирант, Шельяков Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент Воткинского филиала Ижевского государственного технического университета.

*Контактный телефон (34145) 5-23-93.
E-mail: davyd85@mail.ru, alshelp@mail.ru*

При сравнении качества процессов регулирования на реальных объектах были приняты следующие регуляторы:

- ПИД-регулятор, настроенный на максимальную скорость выхода на уставку (1);
- ПИД-регулятор, настроенный на минимальное перерегулирование температуры (2);
- регулятор с применением адаптивного алгоритма с использованием импульсного энергетического метода (3).

Анализ качественных характеристик показывает, что процесс регулирования первым регулятором характеризуется большой амплитудой перерегулирования Y_{II} и затяжной длительностью переходного процесса t_{m1} . Второй регулятор обеспечил минимальное перерегулирование, но при этом длительность переходного процесса t_{m2} достаточно большая. Применение адаптивного алгоритма с использованием импульсного энергетического метода позволило обеспечить минимально возможную длительность переходного процесса t_{m3} без перерегулирования и с последующей удовлетворительной точностью регулирования.

Результаты исследования новой системы автоматического регулирования показали эффективность управления по сравнению с существующими системами.

Список литературы

1. Шельяков А.Н. К вопросу об энергетическом импульсном методе регулирования параметров объекта // Наука. Техника. Образование: Сб. тр. научно-методич. конфер. Воткинского филиала ИжГТУ. Екатеринбург-Ижевск: Изд. института экономики УрО РАН. 2008.
2. Шельяков А.Н., Давыдов И.А. Импульсный энергетический метод управления объектами // Интеллектуальные системы в производстве. 2010. Вып. 1. Ижевск: ИжГТУ, 2010.
3. Давыдов И.А., Шельяков А.Н. Исследование параметров переходных процессов при воздействии на объект одиночным управляющим импульсом // Измерение, контроль и диагностика. Ижевск: Проект, 2010.
4. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1982.

На "олимпийской" трассе станет светло благодаря "РТСофт"

Компания "РТСофт" завершила разработку проекта по автоматизированной системе управления наружным освещением (АСУ НО) участка "олимпийской" трассы М-4 и выполнила поставку шкафного оборудования. М4 — федеральная автомобильная трасса, которая станет самой короткой дорогой от столицы нашей Родины до столицы Олимпиады-2014 — Сочи.

АСУ НО будет внедряться на отрезке федеральной автомобильной трассы М-4 Липецк — Воронеж протя-

женностью 45 км и охватит расположенные вдоль трассы трансформаторные подстанции.

Шкафное оборудование для АСУ НО дороги М-4 построено на базе современных программно-технических средств. Так, например, шкафы телемеханики содержат ПЛК, реализованные на базе платформы автоматизации TWIDO производства Schneider Electric.

В настоящее время "РТСофт" продолжает работы по внедрению АСУ НО на трассе М-4 Липецк — Воронеж.

[Http://www.rtsoft.ru](http://www.rtsoft.ru)