



## УПРАВЛЕНИЕ ТП АДАПТИВНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРИ РАБОТЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

А.М. Шубладзе, С.И. Кузнецов (НИИТеплоприбор),  
С.В. Гуляев, А.А. Шубладзе, В.Р. Ольшванг, В.А. Малахов (ИПУ РАН)

Институтом проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН разработаны адаптивные импульсные регуляторы, на основе которых можно создавать высокоэффективные системы автоматического управления нестационарными динамическими процессами с любыми типами исполнительных органов. Качественные показатели работы систем, основанных на таких регуляторах, многократно превышают аналогичные показатели систем управления, основанных на классических ПИД-регуляторах. В статье проводится сравнение эффективности работы ПИД и импульсных регуляторов с различными типами исполнительных органов в системах управления температурными режимами сушильной камеры, которое показало значительное преимущество предлагаемых регуляторов перед ПИД-регулятором в режимах работы сушильной камеры как с постоянными, так и с переменными параметрами.

Во многих случаях выбор того или иного закона управления ТП зависит как от динамических и статических характеристик этого процесса, так и в значительной степени от типа исполнительного органа, преобразующего выходной сигнал регулятора в силовое воздействие на ТП. Рассмотрим работу различных адаптивных импульсных регуляторов с тремя типами исполнительных устройств, два из которых реализуют пропорциональную зависимость выходного воздействия от их входного сигнала, а третий тип представляет собой интегральный механизм с постоянной скоростью изменения рабочего органа.

К первому типу относится работающий в ШИМ-режиме быстродействующий, имеющий широкую полосу пропускания входного сигнала тепловой электрический нагреватель (ТЭН). Ко второму типу — механическое устройство с ограниченным числом перемещений рабочего органа (например, электромеханический регулирующий клапан). К третьему типу — также механическое устройство, рабочий орган которого перемещается двигателем постоянной скорости, имеющим ограниченное число включений.

Наиболее представительным классом ТП, в которых силовое воздействие осуществляется с помощью ТЭНов, являются процессы регулирования температуры в электропечах и сушильных камерах. В настоящее время для управления промышленными электропечами используются ПИД-регуляторы с ШИМ-преобразователем, который в релейном режиме определяет величину тепловой мощности, отбираемой от электрического нагревательного элемента. При этом связь между сигналом управления  $u(t)_{\text{ПИД}}$ , законом изменения температуры внутри печи  $t_{\text{мз}}^0(t)$  и реальной температурой  $t_p^0(t)$  определяется выражением:

$$u(t)_{\text{ПИД}} = k_n \varepsilon(t) + k_u \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + k_d \dot{\varepsilon}(t),$$

где  $u(t)_{\text{ПИД}}$  — непрерывный сигнал,  $k_n$ ,  $k_u$  и  $k_d$  — настроечные параметры регулятора,  $\varepsilon(t) = t_{\text{мз}}^0(t) - t_p^0(t)$  — ошибка регулирования.

Не ограничивая общности, можно считать, что выходной сигнал регулятора  $u(t)_{\text{ПИД}}$  изменяется в диапазоне  $0 \leq u(t)_{\text{ПИД}} \leq 1$ , поэтому после ШИМ преобразования имеем импульсный сигнал  $u_{\text{шим}}(t)$ , который принимает значения "0" или "1" и среднее значение которого  $q(t) \approx u(t)_{\text{ПИД}}$ . Сигнал  $u_{\text{шим}}(t)$  с помощью усилителя мощности включает на время импульса  $T_{\text{имп}}(t)$  ТЭН печи. При работе в таком режиме тепловая мощность, снимаемая с ТЭНа, пропорциональна  $q(t)$ .

Многократно изменяющиеся в процессе эксплуатации параметры электропечи представляют собой основную проблему, которую приходится решать при выборе настроечных параметров  $k_n$ ,  $k_u$  и  $k_d$  в ПИД-регуляторах. При этом, как правило, выбор этих настроечных параметров осуществляется один раз на "пустой" печи, поэтому качество процессов управления тепловыми режимами "загруженной" печи будет существенным образом зависеть от априори неизвестных физических свойств материала, который находится в печи, степени заполнения печи, от величины сигнала управления  $u(t)$  и т.д. Указанные факторы приводят к многократно изменяющимся параметрам печи как объекта управления, что и создает проблемы эффективного высокоточного управления ее тепловыми режимами с помощью ПИД-регуляторов.

Предлагаемый адаптивный импульсный регулятор первого типа, как было отмечено в [1], по своей сути близок к регуляторам переменной структуры, рассмотренным в [2]. Но адаптивные возможности этих регуляторов недостаточно эффективны, поэтому они не позволяют с необходимой точностью управлять объектами в условиях, изменяющихся в широких диапазонах параметров и неконтролируемых возмущений, что имеет место при управлении тепловы-

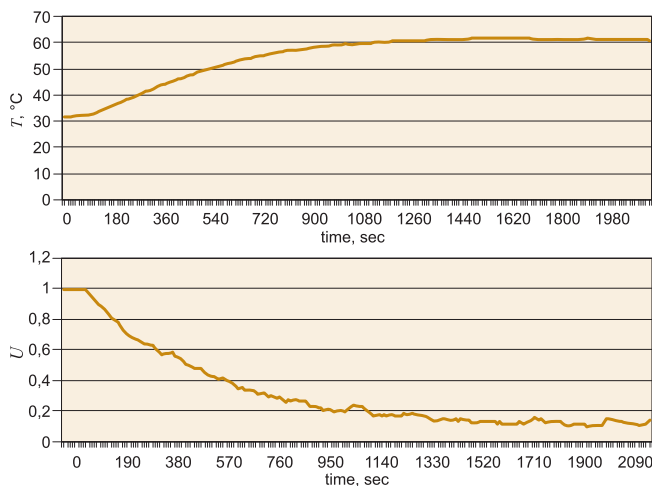


Рис. 1. Переходной процесс изменения температуры в диапазоне 32...60°C с ПИД-регулятором (верхняя часть) незагруженной сушильной камеры и соответствующий ей сигнал управления (нижняя часть)

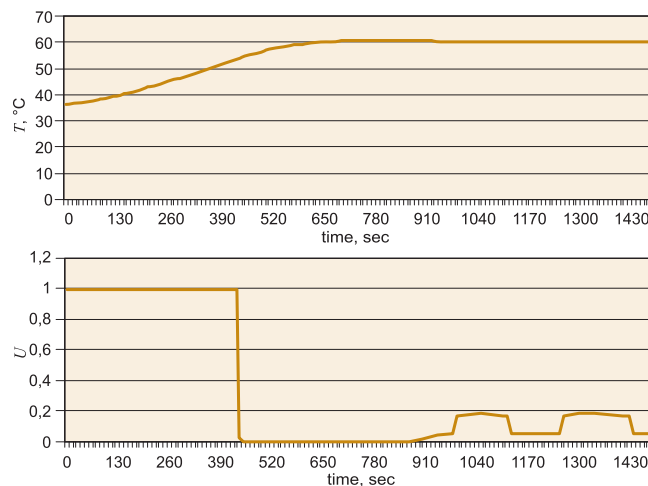


Рис. 2. Переходной процесс изменения температуры в диапазоне 32...60°C импульсным регулятором первого типа (верхняя часть) незагруженной сушильной камеры и соответствующий ей сигнал управления (нижняя часть)

ми режимами печей. Импульсный регулятор, обладая высокими адаптивными возможностями, позволяет эффективно решать указанные задачи управления. Формирование управляющего воздействия в нем можно представить в виде:

$$u_{\text{имп}}(t) = \begin{cases} f_1(t) \text{ при } (s_1(t) + s_2(t)) > 0, \\ f_2(t) \text{ при } (s_1(t) + s_2(t)) < 0, \end{cases}$$

где  $s_1(t) = \epsilon(t) + \kappa_d \dot{\epsilon}(t)$ ,  $\kappa_d$  в линейной комбинации  $s_1(t)$  определяется динамическими свойствами объекта управления;  $s_2(t)$ ,  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  — непрерывные функции динамического преобразования ошибки  $\epsilon(t)$  при этом  $f_1(t) > f_2(t) > 0$ . Назначение функций  $s_1(t)$ ,  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  состоит в парировании изменяющихся статических характеристик объекта и компенсации неконтролируемых внешних возмущений, а с помощью  $s_2(t)$  парируются изменения динамических характеристик объекта.

Продемонстрируем возможности адаптивного импульсного регулятора при управлении сушильной камерой "Термостат №3" путем сравнения его работы с работой линейного ПИД-регулятора.

При выборе настроечных параметров ПИД-регулятора была использована математическая модель сушильной камеры вида:

$$W_{об}(p) = \frac{K_o}{(T_1 p + 1)^n (T_2 p + 1)},$$

где  $K_o = 80,25$ ,  $T_1 = 340$  с,  $T_2 = 935$  с и  $n = 2$ . Указанные параметры модели были найдены способом, описанном в [3], на незагруженной сушильной камере "Термостат №3". Настройки регулятора, соответствующие параметрам модели, были выбраны на основе критерия максимальной степени устойчивости и вычислены по формулам, приведенным в [3]. После проведения необходимых вычислений настройки ПИД-регулятора были взяты равными:  $k_n = 0,054$ ,  $k_u = 0,000066$  и  $k_d = 5,5$ .

При проведении сравнения настройки регулятора не менялись. Регистрировались два процесса: зависимости во времени температуры камеры и соответствующий ей управляющий сигнал. Оба процесса размещались на одном рисунке, в верхней части — зависимости температуры  $T(t)$  от времени, в нижней — зависимости управляющего сигнала  $U(t)$  от времени.

На рис. 1 и 2 показаны процессы вывода температуры пустой сушильной камеры на уровень 60°C настроенным оптимально по быстродействию ПИД-регулятором и импульсным регулятором соответственно. Из этих рисунков видно, что импульсный регулятор выводит температуру на заданный уровень за 550 с, а ПИД-регулятор — за 850 с. При этом, как следует из нижней части рис. 2, время вывода температуры  $T(t)$  на заданный режим было минимально возможным и значительно меньше аналогичного времени оптимально настроенного ПИД-регулятора.

На рис. 3 и 4 показаны процессы вывода температуры сушильной камеры, в которую был помещен металлический брусок весом 15 кг, на уровень 60°C ранее настроенными ПИД-регулятором и импульсным регулятором соответственно. Из рисунков следует, что процесс вывода температуры на заданный уровень импульсным регулятором (верхняя часть рис. 4) протекал в течение минимально возможного времени и заканчивался за 700 с, а аналогичный процесс с ПИД-регулятором не завершался и за 3500 с.

Из приведенных рисунков следует, что импульсный регулятор обладает большими адаптивными возможностями, сочетающимися с высокой эффективностью и качеством решения задач управления объектами с изменяющимися в широких диапазонах параметрами. Отмеченные свойства импульсного регулятора позволяют сделать вывод о его эффективном применении при управлении проблемными с точки зрения автоматизации ТП с помощью быстродействующих пропорциональных исполни-

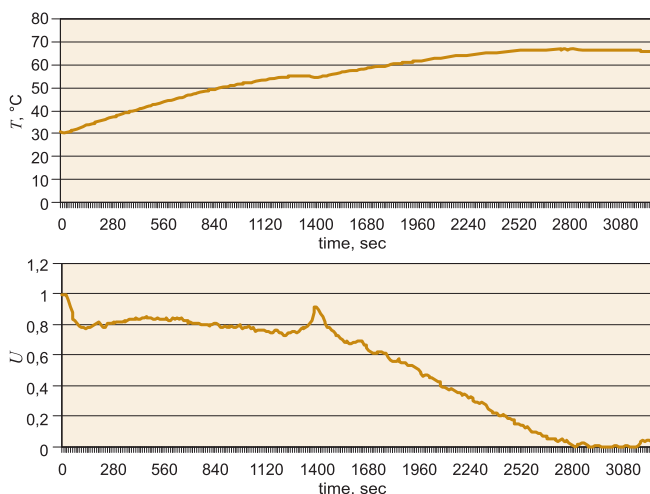


Рис. 3. Переходной процесс изменения температуры в диапазоне 32...60°C с ПИД-регулятором (верхняя часть) загруженной сушильной камеры и соответствующий ей сигнал управления (нижняя часть)

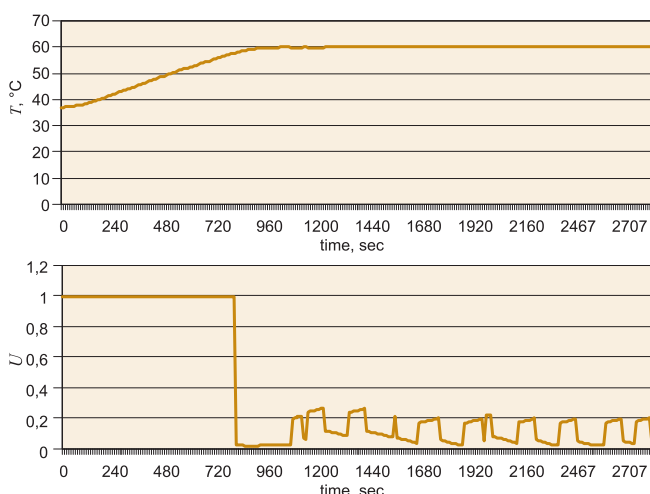


Рис. 4. Переходной процесс изменения температуры в диапазоне 32...60°C импульсным регулятором первого типа (верхняя часть) загруженной сушильной камеры и соответствующий ей сигнал управления (нижняя часть)

тельных механизмов (исполнительных устройств первого типа).

Рассмотренный адаптивный импульсный регулятор управлял электронным коммутатором подаваемого на ТЭН напряжения. Частота коммутаций напряжения в таком исполнительном органе может быть сколь угодно высокой, поэтому никакие ограничения на частотные свойства выходного сигнала регулятора не накладываются.

Иная ситуация, когда выходной сигнал импульсного регулятора подается на используемый в запорной арматуре электромеханический исполнительный орган (исполнительное устройство второго типа), частотные возможности которого ограничены относительно небольшой полосой пропускания и который имеет ограниченное число включений. В таких случаях использование рассмотренного импульсного регулятора не представляется возможным.

Для управления исполнительными механизмами запорной арматуры (исполнительное устройство второго типа) разработан адаптивный импульсный регулятор (импульсный регулятор второго типа), высокая точность регулирования которым сочетается с минимальным числом изменений его выходного сигнала и, следовательно, с минимальным числом включений пропорционального исполнительного механизма.

Информацией для процесса адаптации в регуляторе являются формируемые в нем импульсные управляющие воздействия. Этот импульсный регулятор, как и рассмотренный ранее, близок к регуляторам СПС [2], но в отличие от ранее рассмотренного амплитуда управляющего импульса регулятора постоянна между интервалами переключения и определяется в момент его формирования в соответствии с выражением:

$$u_{2умп}(t) = \begin{cases} f_1(t_i) \text{ при } (s_1(t) + s_2(t)) > 0, \\ f_2(t_i) \text{ при } (s_1(t) + s_2(t)) < 0, \\ s_1(t_i - \Delta t) + s_2(t_i - \Delta t) < 0, \\ s_1(t_i + \Delta t) + s_2(t_i + \Delta t) > 0, \\ s_1(t_i - \Delta t) + s_2(t_i - \Delta t) < 0, \\ s_1(t_i + \Delta t) + s_2(t_i + \Delta t) < 0, \end{cases}$$

где  $\Delta t > 0$  — сколь угодно малая величина,  $s_1(t) = \epsilon(t) + \kappa_\delta \dot{\epsilon}(t)$ ,  $\kappa_\delta$  в линейной комбинации  $s_1(t)$ , как и в рассмотренном ранее случае, определяется динамическими свойствами объекта управления,  $s_2(t)$  — динамическое преобразование линейным инерционным звеном функции  $u_s(t) = \text{sign } u_{2умп}(t)$ ,  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  — непрерывные функции динамического преобразования модуля ошибки  $\epsilon(t)$  при этом  $f_1(t) > f_2(t) > 0$ ,  $t_i$  и  $t_i -$  моменты формирования импульсного управляющего воздействия.

Рассмотрим далее работу настроенного импульсного регулятора второго типа и оценим его потребительские возможности в сравнении с аналогичными возможностями настроенного по степени устойчивости дискретного линейного ПИД-регулятора, выходной сигнал которого квантовался по времени с дискретностью 100 с.

На рис. 5 и 6 показаны процессы вывода температуры сушильной камеры с уровня 60°C на уровень 70°C соответствующим изменением задающего сигнала в ПИД-регуляторе и импульсном регуляторе. В каждом из рисунков в течение времени 0...3000 с представлены процессы изменения температуры сушильной камеры (верхний график), управляющего сигнала регулятора (средний график) и задающего сигнала (нижний график).

На рис. 5 представлены процессы с ПИД-регулятором с дискретностью 100 с, на рис. 6 — процессы с импульсным регулятором второго типа. Из этих рисунков видно, что во всех случаях время вывода температуры на уровень 70°C составляло примерно 450 с. Но для стабилизации на этом уровне импульсному регулятору потребовалось всего пять включений пропорционального исполнительного органа, ПИД-ре-

гулятору с квантованием 100 с – 26 включений. Дальнейшее увеличение дискретности этого ПИД-регулятора невозможно из-за потери устойчивости системы управления.

Проведенный эксперимент показал, что высокие, близкие к оптимальным по быстродействию показатели работы импульсного регулятора сочетаются в нем с минимальным числом включений исполнительного органа, которое в 5 раз меньше аналогичного числа при управлении цифровым ПИД-регулятором с искусственно увеличенным временем дискретности, выводящим систему управления на границу устойчивости, делая ее практически неработоспособной.

Из сказанного следует, что рассмотренные типы адаптивных импульсных регуляторов, работающих совместно с пропорциональными исполнительными органами, эффективно управляют ТП, обеспечивая необходимую точность регулирования и высокий ресурс средств автоматки.

Для использования импульсных регуляторов (импульсных регуляторов третьего типа) с интегральным исполнительным механизмом достаточно в структуру импульсного регулятора второго типа ввести блок, преобразующий прямоугольные управляющие импульсы  $u_{2имп}(t)$  в короткие одиночные импульсы "малой" длительности. Назовем регуляторы с таким блоком импульсными регуляторами третьего типа. Алгоритм работы введенного блока можно представить в виде следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 u_{3имп}(t) &= u_+(t) + u_-(t), \\
 u_+(t) &= 0,5(1 + \text{sign } \varepsilon_+(t)), \\
 \varepsilon_+(t) &= \kappa_{сп} u_{3имп}(t) + \varepsilon_{рз}(t) - (\kappa_{сп} + \kappa_{зн}), \\
 u_-(t) &= 0,5(-1 + \text{sign } \varepsilon_-(t)), \\
 \varepsilon_-(t) &= \kappa_{сп} u_{3имп}(t) + \varepsilon_{рз}(t) - (\kappa_{сп} + \kappa_{зн}), \\
 \varepsilon_{рз}(t) &= u_{2имп}(t) - \frac{1}{T_{ин}} \int_0^t u_{3имп}(\tau) d(\tau),
 \end{aligned}$$

где  $\kappa_{сп} > 0$  и  $\kappa_{зн} > 0$  – достаточно малые значения, при которых  $\kappa_{сп}$  определяет минимальное время включения интегрального исполнительного механизма, а  $\kappa_{зн}$  – точность преобразования сигнала управления  $u_{2имп}(t)$  в оценку его усредненной производной.

Приведенная система уравнений описывает работу блока, в котором реальная производная импульсного сигнала управления  $u_{2имп}(t)$  преобразуется в последовательность таких положительных и отрицательных импульсов единичной амплитуды и переменной длительности, интеграл от которых, формируемый интегральным исполнительным механизмом, близок к функции управления  $u_{2имп}(t)$ . Поэтому отмеченное обстоятельство в импульсных регуляторах третьего типа является гарантией как высокого качества работы системы управления, так и ее ресурса.

Сравним работу импульсного регулятора третьего типа с работой оптимального по степени устойчивости линейного ПИД-регулятора с дискретностью

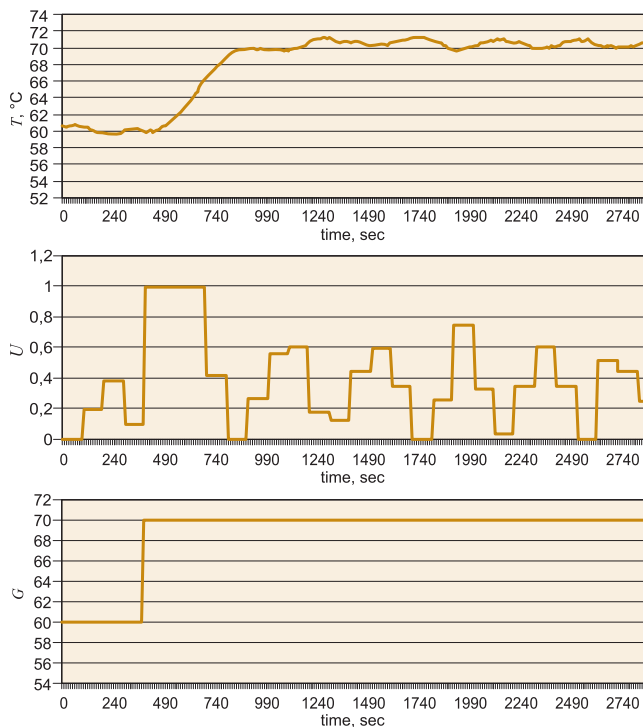


Рис. 5. Процесс вывода температуры сушильной камеры с уровня 60°C на уровень 70°C с оптимальным по степени устойчивости ПИД-регулятором и дискретностью 100 с (верхняя часть), соответствующий ему сигнал управления (средняя часть) и задающее воздействие (нижняя часть)

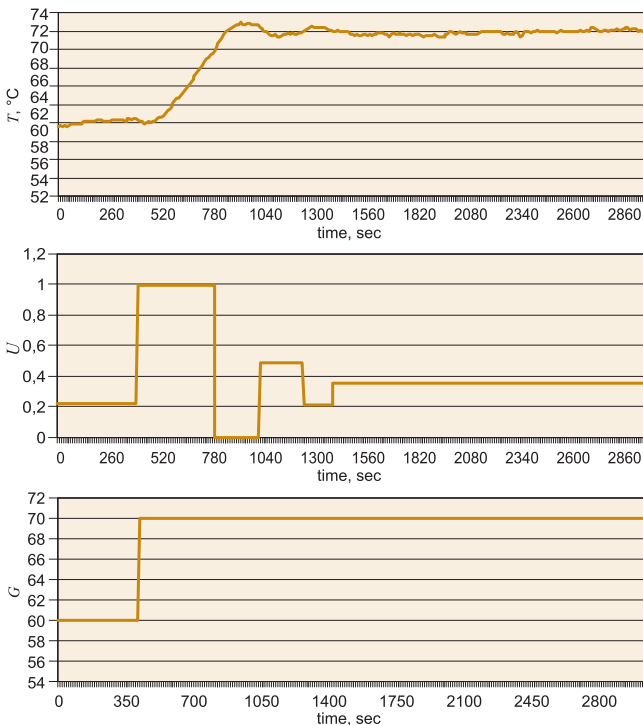


Рис. 6. Процесс вывода температуры сушильной камеры с уровня 60°C на уровень 70°C импульсным регулятором второго типа (верхняя часть), соответствующий ему импульсный сигнал управления (средняя часть) и задающее воздействие (нижняя часть)



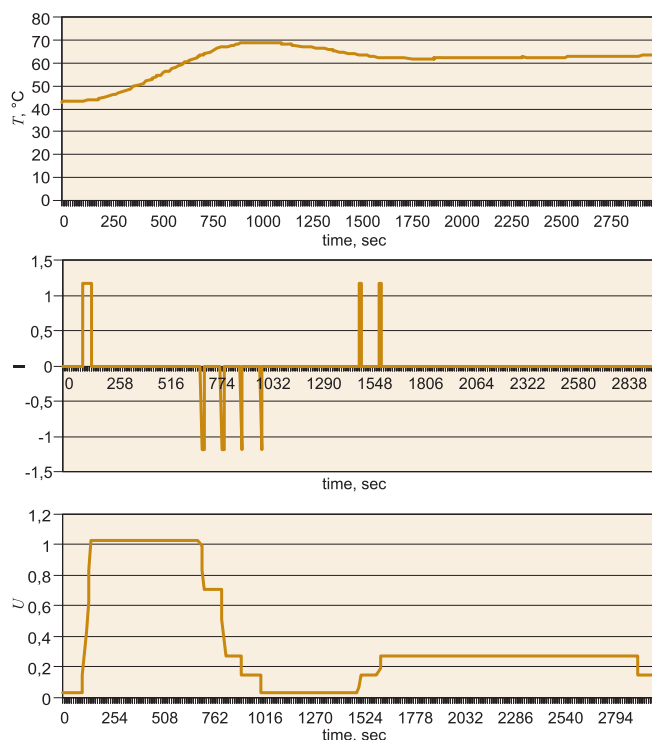


Рис. 7. Процесс вывода температуры сушильной камеры на уровень  $60^{\circ}\text{C}$  с оптимальным по степени устойчивости ПИД-регулятором с дискретностью 100 с и нелинейным блоком (верхняя часть), соответствующий ему сигнал управления интегральным исполнительным механизмом (средняя часть) и выходной сигнал интегрального исполнительного механизма (нижняя часть)

100 с, выходной сигнал  $u_{\text{ПИД}}(t)$  которого, как и выходной сигнал импульсного регулятора второго типа  $u_{2\text{имп}}(t)$  также преобразуется в последовательность импульсов, интеграл от которых близок к функции управления  $u_{\text{ПИД}}(t)$ .

На рис. 7 и 8 показаны процессы вывода температуры сушильной камеры на уровень  $60^{\circ}\text{C}$  в ПИД-регуляторе и импульсном регуляторе третьего типа. В каждом из рисунков представлены процессы изменения температуры сушильной камеры (верхний график), импульсные сигналы включения интегрального исполнительного механизма постоянной скорости (средний график) и выходной сигнала исполнительного механизма (нижний график).

Из рис. 7 и 8 видно, что время вывода температуры на уровень  $60^{\circ}\text{C}$  с помощью ПИД-регулятора фактически не закончилось и к 3000 с, тогда как в адаптивном импульсном регуляторе этот процесс закончился на 450 с. При этом число включений при ПИД управлении равнялось 8 ед., а в импульсном — 6 ед. Проведенный эксперимент показал, что, как и в пре-

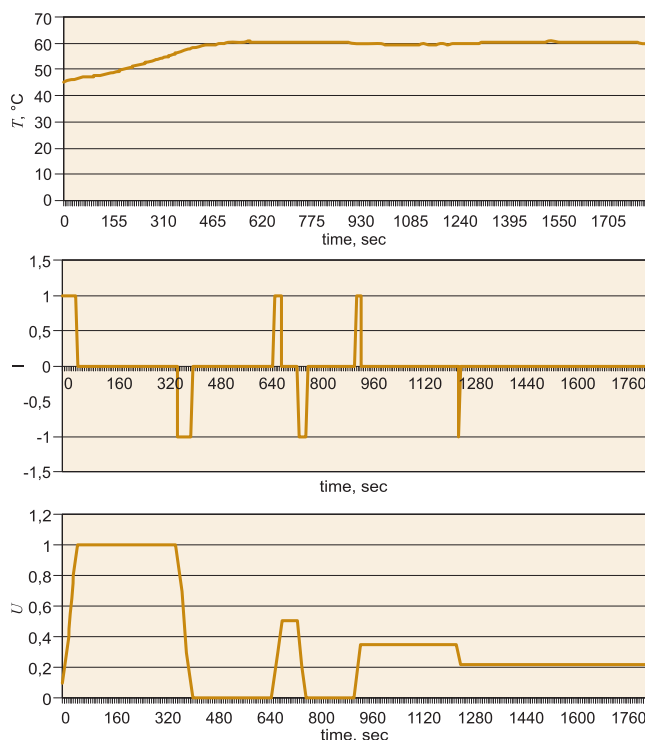


Рис. 8. Процесс вывода температуры сушильной камеры на уровень  $60^{\circ}\text{C}$  импульсным регулятором третьего типа (верхняя часть), соответствующий ему импульсный сигнал управления интегральным исполнительным механизмом (средняя часть) и выходной сигнал интегрального исполнительного механизма (нижняя часть)

дыдущем случае, высокие, близкие к оптимальным по быстродействию показатели работы импульсного регулятора третьего типа сочетаются в нем с минимальным числом включений исполнительного органа.

Из сказанного следует, что рассмотренные типы адаптивных импульсных регуляторов всех типов, работающие с любыми исполнительными органами, эффективно управляют ТП, обеспечивая высокую точность регулирования и ресурс средств автоматики, в разы превышающий ресурс при ПИД-регулировании.

#### Список литературы

1. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А., Ольшванг В.Р., Малахов В.А. Высокоточное управление электродвигателями адаптивным кусочно-непрерывным регулятором (АКН-регулятором) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. №5.
2. Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А., Костылева Н.Е., Шубладзе А.М., Езеров В.Б., Дубровский Е.Н. Теория систем с переменной структурой. Изд-во "Наука". Главная редакция физико-математической литературы. М.: 1970.
3. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы // Приборы и системы. 2002. №10.

**Шубладзе Александр Михайлович** — д-р техн. наук, **Гуляев Сергей Викторович** — канд. техн. наук, **Шубладзе Александр Александрович** — канд. техн. наук, **Ольшванг Владимир Рафаилович** — канд. техн. наук, **Малахов Валерий Александрович** — канд. техн. наук, научные сотрудники ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.

**Кузнецов Сергей Иванович** — ген. директор НИИТеплоприбор.

Контактный телефон (095) 334-88-81.

E-mail: shub@ipu.rssi.ru