

# КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

*В. И. Зенкин, В. А. Постой, О. Р. Савин, И. Я. Чертков*

Тепловые объекты экстремального регулирования, как известно, обладают большой инерционностью, поэтому переходные процессы при поиске экстремума могут быть весьма колебательными, с большой амплитудой рыскания, что приводит к ухудшению качества экстремального регулирования.

Вопросу уменьшения влияния инерционности объекта регулирования на процесс поиска экстремума посвящен ряд работ [1—3]. В настоящей статье, отправляясь от основных идей, изложенных в указанных работах, мы проводим некоторые новые результаты, с помощью которых решается задача практической реализации вычислительного устройства экстремального регулятора шагового типа для тепловых процессов. Серийный выпуск таких регуляторов осваивается Сумским заводом электронных микроскопов и электроавтоматики.

## Структурная схема и понятие эффективности работы объекта экстремального регулирования

Тепловые объекты экстремального регулирования (вагранка, нагревательный колодец и др.) структурно можно представить в виде двух последовательно соединенных звеньев (рис. 1): а) нелинейное безынерцион-

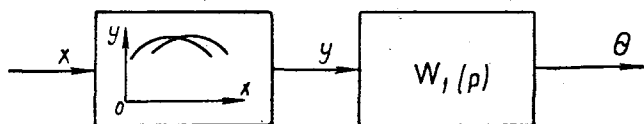


Рис. 1. Структурная схема объекта регулирования.

ное звено, входная величина  $x$  которого (регулирующее воздействие) и выходная  $y$  (статическое значение показателя экстремума) связаны уравнением

$$y = F[x, a(t), b(t), \dots, e(t)], \quad (1)$$

где  $a(t), b(t), \dots, e(t)$  — переменные параметры, определяющие статическую экстремальную характеристику в координатной плоскости  $yOx$  в момент времени  $t$ ; б) линейное звено с передаточной функцией  $W_1(p)$ , входная величина  $y$  и выходная  $\theta$  (текущее значение показателя экстремума) которого связаны дифференциальным уравнением

$$a_n \frac{d^n \theta}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \theta}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 y, \quad (2)$$

где  $k_0 > 0$  — передаточный коэффициент линейного звена.

Например, при плавке чугуна в вагранке с изменением дутья  $x$  изменяется предельная температура  $y$  (являющаяся экстремальной функцией дутья [2]), которая с течением времени достигает величины  $\theta(t)$  жидкого чугуна в точке замера. С повышением температуры выплавляемого чугуна улучшается качество отливок. При нагреве стальных слитков перед прокатом в нагревательных колодцах в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $x$  изменяется предельная температура в колодце  $y$  (являющаяся экстремальной функцией  $x$ ), а следовательно, и скорость подъема температуры слитков  $\theta$  — показатель эффективности процесса нагрева.

Режим работы объектов, класс которых здесь рассматривается, является наиболее эффективным на интервале  $(t_1, t_2)$ , если среднеинтегральное значение текущего значения показателя экстремума (характеризующее среднюю температуру выплавляемого чугуна, среднюю скорость нагрева слитков и т. д.)

$$\theta_{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \theta(t) dt$$

принимает на этом интервале наибольшее возможное значение.

Задача поддержания параметра  $\theta$  на уровне, наиболее близком к экстремуму, может быть решена применением экстремального регулятора шагового типа, который для инерционных объектов имеет ряд преимуществ по сравнению с регуляторами других типов [4] с точки зрения простоты, помехоустойчивости и быстродействия.

### Структурная схема системы экстремального регулирования

Алгоритм работы экстремального регулятора шагового типа, как известно, имеет вид

$$\Delta x_{n+1} = \alpha \operatorname{sign} \Delta \theta_n \cdot \operatorname{sign} \Delta x_n,$$

где  $\alpha = |\Delta x|$  — величина шага регулирующего воздействия;

$\Delta \theta_n$  — приращение показателя экстремума в  $n$ -м цикле регулирования\*.

Структурная схема системы экстремального регулирования представлена на рис. 2,а (датчик для измерения текущего значения показателя экстремума изображен линейным звеном с передаточной функцией  $W_d(p)$ ).

С целью уменьшения влияния на процесс поиска экстремума инерционности линейных звеньев  $W_1(p)$  и  $W_g(p)$  будем вводить в логическое устройство экстремального регулятора не текущее значение показателя экстремума, а его статическое значение [1], т. е. построим закон регулирования вида

$$\Delta x_{n+1} = \alpha \operatorname{sign} \Delta y_n \operatorname{sign} \Delta x_n, \quad (3)$$

где  $\Delta y_n$  — приращение статического значения показателя экстремума.

Структурная схема системы экстремального регулирования принимает вид, показанный на рис. 2,б. Задача экстремального регулирования сводится к нахождению на интервале  $(t_1, t_2)$  такого закона изменения регулирующего воздействия, чтобы функционал

$$I(x) = \int_{t_1}^{t_2} F[x, a(t), b(t), \dots, e(t)] dt$$

\* Здесь и дальше пользуемся восходящими разностями [5], т. е. для функции  $U$   
 $\Delta U_n = U_n - U_{n-1}$

принимал наибольшее возможное значение. Поддержание среднего значения параметра  $y$  на уровне, наиболее близком к экстремуму, вызывает соответствующее увеличение среднего значения величины на выходе линейного звена  $\theta$ , которая, в конечном счете, характеризует эффективность протекания технологического процесса. В самом деле, пусть моменты времени  $t = 0$  и  $t = \bar{T}$  соответствуют двум практическим установившимся режимам, т. е.

$$\begin{aligned} \theta(0) &= k_0 y(0) = k_0 y_0; \quad \dot{\theta}(0) = \ddot{\theta}(0) = \dots = \theta^{(n-1)}(0) = 0; \\ \theta(\bar{T}) &= k_0 y(\bar{T}) = k_0 y; \quad \dot{\theta}(\bar{T}) = \ddot{\theta}(\bar{T}) = \dots = \theta^{(n-1)}(\bar{T}) = 0. \end{aligned}$$

Проинтегрировав (2) в промежутке  $(0, \bar{T})$ , имеем

$$\int_0^{\bar{T}} \theta(t) dt + k_0 a_1 (y_1 - y_0) = k_0 \int_0^{\bar{T}} y dt,$$

или  $\theta_{\text{ср}} = k_0 y_{\text{ср}} + A,$

где  $y_{\text{ср}} = \frac{1}{\bar{T}} \int_0^{\bar{T}} y dt; \quad \theta_{\text{ср}} = \frac{1}{\bar{T}} \int_0^{\bar{T}} \theta dt;$

$$A = k_0 a_1 \frac{y_0 - y_1}{\bar{T}} = \text{const.}$$

Теперь нетрудно видеть, что большему среднему значению  $y_{\text{ср}}$  соответствует большее значение и  $\theta_{\text{ср}}$ , т. е. система экстремального регулирования с законом управления (3) рис. 2, б выполняет поставленную задачу поддержания параметра  $\theta$  на уровне, наиболее близком к экстремуму.

Для реализации (3) требуется измерять косвенным путем статическое значение показателя экстремума  $y$  (не поддающееся, как правило, непосредственному измерению), т. е. построить дополнительное звено (модель) : передаточной функцией

$$W_M^*(z) = 1/W^*(z),$$

где  $W^*(z)$  — дискретное преобразование Лапласа [5] передаточной функции  $\bar{W}(p) = \bar{W}_1(p) \bar{W}_2(p)$  линейных звеньев после экстремальной характеристики.

Поскольку в большинстве случаев такое дополнительное звено не может быть построено, так как его импульсная передаточная функция оказывается физически нереализуемой (степень полинома числителя выше степени полинома знаменателя), то будем искать из числа физически реализуемых звеньев такое, которое наилучшим образом аппроксимировало бы  $\bar{W}_M^*(z)$ , т. е. позволило бы определять  $\Delta y_n$ , необходимое для реализации 3), с наибольшей точностью.

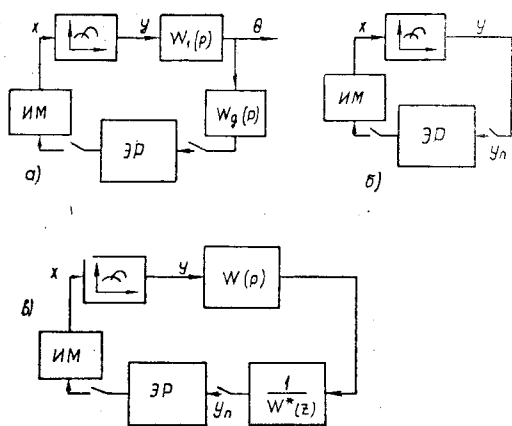


Рис. 2. Структурная схема системы экстремального регулирования: ИМ — исполнительный механизм, ЭР — экстремальный регулятор.

### Алгоритм работы вычислительного устройства экстремального регулятора

Рассмотрим случай, когда переходные процессы в линейной части объекта регулирования и в датчике описываются дифференциальными уравнениями 1-го порядка. Как известно, такая линеаризация обычно допустима при исследовании автоматизируемых тепловых объектов.

$$\tau_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = y; \quad (4a)$$

$$\tau_T \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_T \theta, \quad (4b)$$

где  $k_T$  — коэффициент пропорциональности (поскольку  $y$  и  $\theta$  — величины одной физической природы, для простоты принято  $k_0 = 1$ );

$\tau_0, \tau_T$  — постоянные времени, причем  $\tau_0 \neq \tau_T$ ;

$\varphi$  — сигнал на выходе датчика.

Пренебрегая временем работы исполнительного двигателя по сравнению с длительностью цикла регулирования  $T$  (т. е. полагая в  $n$ -м цикле  $y = y_n = \text{const}$  \* [6]), проинтегрируем уравнения (4) в пределах  $n$ -го цикла регулирования. С этой целью перейдем к относительному времени  $t_1 = t/T$ , а также перенесем начало отсчета времени  $t_2 = t_1 - n + 1$  \*\*. Тогда вместо (4) получим

$$\tau \frac{d\theta}{dt_2} + \theta = y_n,$$

$$\lambda \frac{d\varphi}{dt_2} + \varphi = k_T \theta,$$

где  $\tau = \tau_0/T$ ;  $\lambda = \tau_T/T$ ,

или, в области изображений

$$\theta(p) = \frac{y_n}{p} - \frac{y_n - \theta_{n-1}}{p + 1/\tau}; \quad (5a)$$

$$\varphi(p) = k_T \frac{y_n}{p} - \frac{k_T y_n}{p + 1/\lambda} - \frac{k_T \tau}{\lambda - \tau} \cdot \frac{y_n - \theta_{n-1}}{p + 1/\lambda} + \frac{k_T \tau}{\lambda - \tau} \cdot \frac{y_n - \theta_{n-1}}{p + 1/\tau} + \frac{\varphi_{n-1}}{p + 1/\lambda}. \quad (5b)$$

Переходя в (5) к оригиналу и полагая  $t_2 = 1$ , находим для  $n$ -го и  $n-1$ -го циклов регулирования

$$\theta_{n-1} = k_1 \theta_{n-2} + y_{n-1} (1 - k_1); \quad (6)$$

$$\varphi_n = a y_n + b \theta_{n-1} + k_2 \varphi_{n-1}; \quad (7a)$$

$$\varphi_{n-1} = a y_{n-1} + b \theta_{n-2} + k_2 \varphi_{n-2}, \quad (7b)$$

где  $k_1 = e^{-1/\tau}$ ;  $k_2 = e^{-1/\lambda}$ ;  $a = k_T \left( 1 - \frac{k_1 \tau}{\tau - \lambda} + \frac{k_2 \lambda}{\tau - \lambda} \right)$ ;  $b = k_T \tau \frac{k_1 - k_2}{\tau - \lambda}$ .

Решая совместно (6) и (7), получаем

$$y_n = \frac{1}{a} [\varphi_n - (k_1 + k_2) \varphi_{n-1} + k_1 k_2 \varphi_{n-2} - c y_{n-1}], \quad (8)$$

где  $c = b - k_1(a + b)$ .

\* Построение закона регулирования по формуле (3) позволяет, выбрав период регулирования  $T$  достаточно малым, увеличить скорость поиска экстремума. В этом случае смещения экстремальной характеристики в пределах нескольких циклов регулирования имеют, в основном, характер медленных дрейфов, так что при решении поставленной задачи можно положить в (1)

$a = \text{const}$ ;  $b = \text{const}$ , ...  $l = \text{const}$ .

\*\* - При интегрировании в пределах  $n$ -го цикла регулирования  $(n-1)T \leq t \leq nT$ ;  $n-1 \leq t_1 \leq n$ ;  $0 \leq t_2 \leq 1$ .

Таким образом, звеном с импульсной передаточной функцией  $W_M^*(z)$  может служить вычислительное устройство с тремя ячейками для запоминания величин  $\varphi_{n-2}$ ;  $\varphi_{n-1}$ ;  $y_{n-1}$ . Для реализации (3) необходимо иметь  $\text{sign } \Delta y_n$ , поэтому, переходя в (8) к приращениям, получаем алгоритм работы вычислительного устройства с релейным элементом на выходе\*:

$$\text{sign } \Delta y_n = \text{sign} [\Delta \varphi_n - (k_1 + k_2) \Delta \varphi_{n-1} + k_1 k_2 \Delta \varphi_{n-2} - c \Delta y_{n-1}], \quad (9)$$

поскольку  $a > 0$  при любых  $0 < \tau < \infty$ ;  $0 < \lambda < \infty$ , что нетрудно показать исследованием поведения функции  $f(u) = ue^{-1/u}$ . В экстремальном регуляторе с компенсацией входного сигнала (7) разности  $\Delta \varphi$ , получающиеся в каждом цикле регулирования автоматически и в ячейках запоминающих устройств хранятся величины  $\Delta \varphi_{n-2}$ ,  $\Delta \varphi_{n-1}$ , необходимые для реализации (9).

Аналогично для случая  $\tau_0 = \tau_T$  находим

$$\text{sign } \Delta y_n = \text{sign} (\Delta \varphi_n - 2k_1 \Delta \varphi_{n-1} + k_1^2 \Delta \varphi_{n-2} - b_1 \Delta y_{n-1}),$$

где  $b_1 = k_T k_1 \frac{1 - \tau + k_1 \tau}{\tau}$ .

Изменим алгоритм (9) так, чтобы отпала необходимость вычисления в  $n$ -м цикле величины  $\Delta y_n$  с последующим хранением ее в запоминающем устройстве. С этой целью из (8) получаем последовательно для приращений:

$$\begin{aligned} a \Delta y_n &= \Delta \varphi_n - (k_1 + k_2) \Delta \varphi_{n-1} + k_1 k_2 \Delta \varphi_{n-2} - c \Delta y_{n-1}; \\ a \Delta y_{n-1} &= \Delta \varphi_{n-1} - (k_1 + k_2) \Delta \varphi_{n-2} + k_1 k_2 \Delta \varphi_{n-3} - c \Delta y_{n-2}; \\ &\dots \dots \dots \\ a \Delta y_{n-s} &= \Delta \varphi_{n-s} - (k_1 + k_2) \Delta \varphi_{n-s+1} + k_1 k_2 \Delta \varphi_{n-s+2} - c \Delta y_{n-s-1}, \end{aligned}$$

откуда после несложных преобразований находим:

$$\begin{aligned} \Delta y_n &= \frac{1}{a} \left\{ \Delta \varphi_n - \left( k_1 + k_2 + \frac{c}{a} \right) \Delta \varphi_{n-1} + (-1)^i \sum_{i=2}^s \left[ \left( \frac{c}{a} \right)^{i-2} k_1 k_2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( \frac{c}{a} \right)^{i-1} (k_1 + k_2) + \left( \frac{c}{a} \right)^i \right] \Delta \varphi_{n-i} + (-1)^{s+1} \left[ \left( \frac{c}{a} \right)^{s-1} k_1 k_2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left( \frac{c}{a} \right)^s (k_1 + k_2) \right] \Delta \varphi_{n-s+1} + (-1)^{s+2} \left( \frac{c}{a} \right)^s k_1 k_2 \Delta \varphi_{n-s-2} \right\} + \\ &\quad + (-1)^{s+1} \left( \frac{c}{a} \right)^{s+1} \Delta y_{n-s-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

причем  $\left| \frac{c}{a} \right| < 1^{**}$ .

\* Несколько другим путем, подобный результат был ранее получен О. М. Крыжатовским и Б. Я. Солтыком [2].

\*\* Для доказательства этого неравенства достаточно показать, что  $|\tau k_2 (1 - k_1) - \lambda k_1 (1 - k_2)| < |\tau (1 - k_1) - \lambda (1 - k_2)|$  (а) при любых  $0 < \tau < \infty$  и  $0 < \lambda < \infty$ . Исследованием поведения функции  $f_1(u) = u(1 - e^{-1/u})$  убеждаемся, что  $\tau(1 - k_1) > \lambda(1 - k_2)$  при  $\tau > \lambda$ , в результате чего неравенство (а) для этого случая принимает вид

$$\tau \frac{1 - k_1}{1 + k_1} > \lambda \frac{1 - k_2}{1 + k_2}. \quad (б)$$

Доказательство неравенства (б) можно выполнить, исследуя поведение функции  $f_2(u) = \frac{1 - e^{-1/u}}{1 + e^{-1/u}}$ . Аналогичным образом справедливость (а) доказывается для случая  $\tau < \lambda$ .

Найдем условие, при котором можно пренебречь последним членом в (10), т. е. условие  $\left| \left( \frac{c}{a} \right)^{s+1} \Delta y_{n-s-1} \right| \leq \delta_c$ , где  $\delta_c$  погрешность при определении  $\Delta y_i$ , обусловленная погрешностью запоминающих и суммирующих устройств, датчика, воздействием помех и т. д. При  $|\Delta y_i| < \delta_c$  информация о  $\Delta y_i$  становится мало достоверной, что, однако, не вносит заметной погрешности в работу регулятора, так как при достаточно малом  $\delta_c$  в этом случае практически безразлично, в какую сторону делать шаг в  $i+1$ -м цикле. При этом учтем, что приращение показателя экстремума за цикл регулирования на реальных объектах является величиной ограниченной, т. е. всегда можно указать такое положительное число  $M$ , что  $|\Delta y_i| < M$ .

Имеем

$$\left| \left( \frac{c}{a} \right)^{s+1} \right| \leq \frac{\delta_c}{|\Delta y_{n-s-1}|} < \frac{\delta_c}{M},$$

откуда

$$s = \frac{\lg \delta_c / M}{\lg \left| \frac{c}{a} \right|} - 1.$$

Например, для  $\tau = 10$ ,  $\lambda = 2$  и  $\frac{\delta_c}{M} = 0,01$  получаем  $s \geq 2$ . Аналогичным путем можно произвести оценку коэффициентов (степень их убывания) при разностях  $\Delta \varphi$  в (10). Расчеты и эксперимент показывают, что для рассматриваемого класса объектов и экстремального регулятора, описанного в (7), коэффициентом при разности  $\Delta \varphi_{n-3}$  в (10) уже вполне можно пренебречь, тем более, что дальнейшие конструктивные усложнения не оправдываются достигаемой точностью при определении  $\text{sign } \Delta y_n$ . Алгоритм работы вычислительного устройства с релейным элементом на выходе принимает вид

$$\text{sign } \Delta y_n = \text{sign} \left\{ \Delta \varphi_n - \left( k_1 + k_2 + \frac{c}{a} \right) \Delta \varphi_{n-1} + \left[ k_1 k_2 + \frac{c}{a} (k_1 + k_2) + \frac{c^2}{a^2} \right] \Delta \varphi_{n-2} \right\}. \quad (11)$$

Аналогичные рассуждения можно привести для случая  $\tau_0 = \tau_T$ . Если инерционностью датчика можно пренебречь ( $\tau_T = 0$ ), из (9) получаем

$$\text{sign } \Delta y_n = \text{sign} (\Delta \varphi_n - k_1 \Delta \varphi_{n-1}). \quad (12)$$

При наличии запаздывания в линейных звеньях  $\text{sign } \Delta y_n$  также может быть вычислено по приращениям сигнала на выходе датчика.

При этом формулы (11) — (12) сохраняют свой вид, изменяются лишь коэффициенты при разностях.

#### Схема вычислительного устройства на суммирующих трансформаторах с фазочувствительным усилителем

Испытание опытных образцов экстремальных регуляторов показало, что тепловые объекты имеют, как правило, пологую экстремальную характеристику, поэтому вычислительное устройство должно обладать высокой чувствительностью (0,05—0,1% от наибольшего значения показателя экстремума, или 0,7—1,5°C на уровне 1500°C при регулировании температуры в нагревательном колодце, вагранке [8]). В экстремальных регуляторах шагового типа для тепловых объектов в связи с этим целе-

сообразно применять узкопредельные измерительные устройства с вторичной компенсацией сигнала от датчика [7]. На рис. 3 представлена принципиальная схема такого измерительного устройства. Напряжение  $\varphi$  от термопары (или другого датчика э. д. с.), измеряется методом автоматической компенсации. Двигатель компенсационной схемы  $Дв_1$  перемещает движок  $B$  реохорда  $R_0$  и связанный с ним движок  $B'$  реохорда  $R'_0$  до тех пор, пока сигнал на входе усилителя  $УС_1 U_{вх1} = \varphi - (U_{AB} + U_{CD})$  не станет равным нулю. Напряжение, пропорциональное приращению  $\Delta\varphi$ , при положении переключателя  $\Pi_1$  в положение 1 снимается с движков  $B'$  реохорда  $R'_0$  и  $B''$  потенциометра  $R$  и записывается в запоминающем устройстве, после чего переключатель  $\Pi_1$  автоматически становится в положение 2. На вход фазочувствительного усилителя  $УС_2$  устройства вторичной компенсации поступает напряжение, пропорциональное приращению  $\Delta\varphi$ , в результате чего двигатель  $Дв_2$  приходит во вращение и изменяет сопротивления  $R_8$  и  $R_9$  (грубой и точной подстройки) компенсационного моста  $М_к$ , выходное напряжение которого  $U_{CD}$  компенсирует напряжение датчика  $\varphi$ . При этом на входе усилителя  $УС_1$  появляется напряжение  $U_{вх1} = \varphi - (U_{AB} + U_{CD}) \approx 0$ , и двигатель  $Дв_1$  будет перемещать движки реохордов  $R_0$  и  $R'_0$  до тех пор, пока напряжение на входе усилителей  $УС_2$  и  $УС_1$  не станет равным нулю, а вся схема придет в свое исходное (нулевое) состояние. После компенсации сигнала переключатель  $\Pi_1$  ставится в положение 1 для измерения и запоминания приращения  $\Delta\varphi$  в следующем цикле регулирования. Точка компенсации задается потенциометром  $R$ .

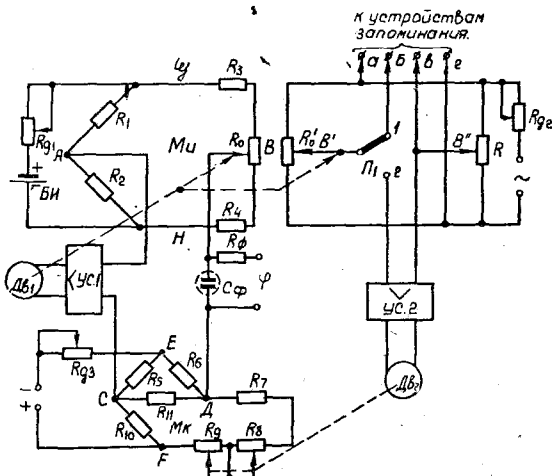


Рис. 3. Измерительное устройство.

Компенсация напряжения датчика производится в каждом цикле регулирования, поэтому для реализации (11) в вычислительном устройстве достаточно иметь две запоминающие ячейки\*.

Принципиальная схема вычислительного устройства представлена на рис. 4. В качестве запоминающих ячеек применены реохорды  $R'_0$  и  $R''_0$  (в пылевлагонепроницаемых экранах), подвижные контакты которых связаны механически с осями микродвигателей  $Дв_3$  и  $Дв_4$  соответственно. Реохорды позволяют обеспечить требуемую чувствительность и длительное хранение информации с большой точностью, что необходимо при работе регулятора на тепловых инерционных объектах [9]. При записи приращений в ячейку  $R'_0$  на вход усилителя  $УС_2$  поступает напряжение с движков реохордов  $R'_0$  и  $R''_0$ , а к его выходу подключается двигатель  $Дв_3$ . Образуется потенциметрическая следящая система [9]; и двигатель  $Дв_3$

\* В известных аналогичных схемах [2], [9] для тех же целей в запоминающем устройстве необходимо иметь 4—6 ячеек.

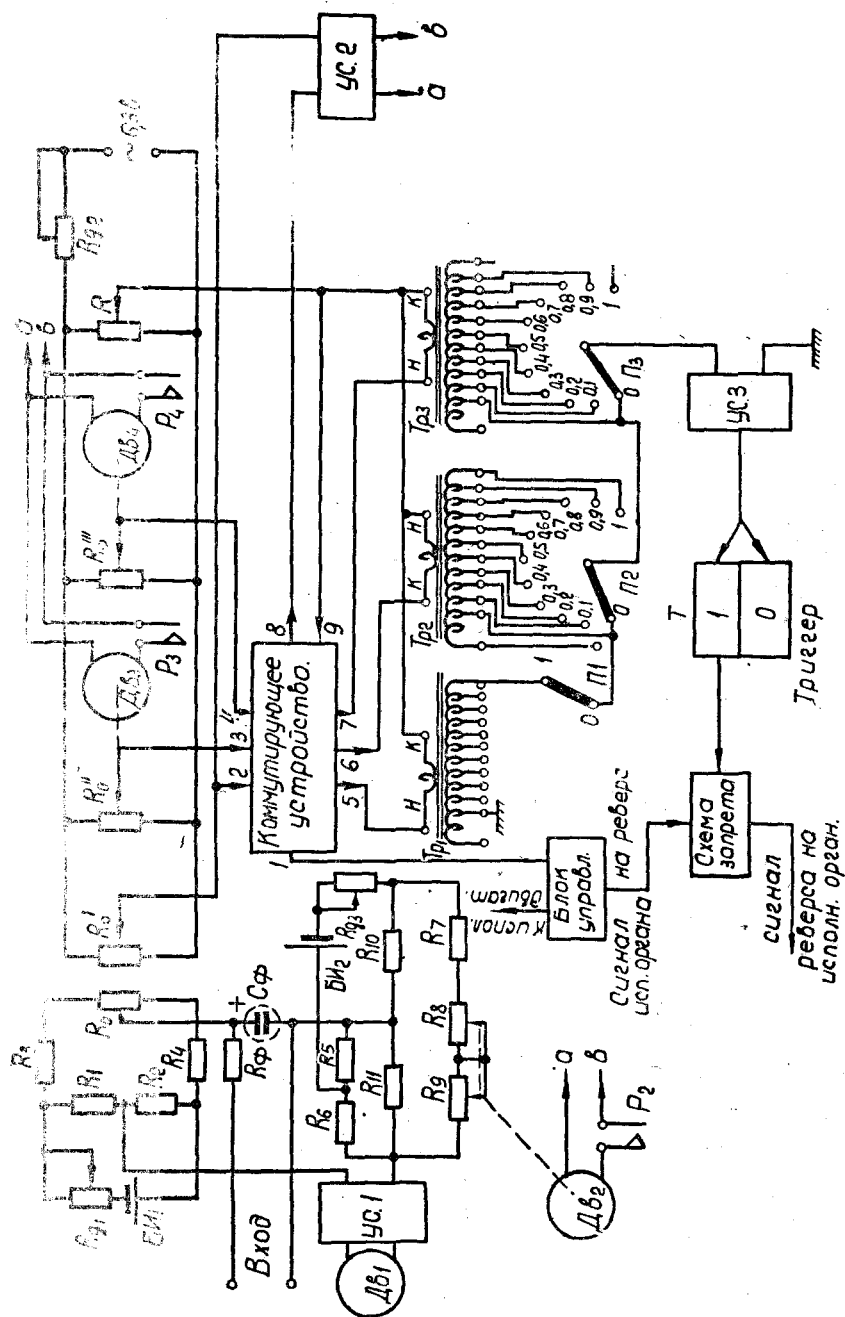


Рис. 4. Вычислительное устройство.

вращается до тех пор, пока движки реохордов  $R'_0$  и  $R''_0$  не установятся в одинаковое положение (напряжение на входе усилителя  $УС_2$  при этом станет равным нулю). Аналогично производится запись в ячейку  $R'''_0$ .

Сигналы с запоминающих ячеек в виде переменных напряжений подаются на сумматор, состоящий из суммирующих трансформаторов  $Tr_1$ ,  $Tr_2$ ,  $Tr_3$  и фазочувствительного усилителя  $УС_3$  с триггером на выходе. Для реализации (11) напряжения на вторичных обмотках трансформаторов  $Tr_2$  и  $Tr_3$  суммируются с учетом коэффициентов при разностях. Сигнал с выхода триггера подается на логическое устройство экстремального регулятора. Введение отрицательного смещения на первый каскад усилителя повышает эффективность работы регулятора.

Описанное вычислительное устройство, обеспечивающее требуемую чувствительность и точность, показало высокую надежность при работе в производственных условиях.

### Повышение помехоустойчивости системы экстремального регулирования

Тепловые объекты рассматриваемого класса иногда подвержены воздействию возмущений, в результате чего на полезный сигнал на выходе датчика накладываются помехи определенного спектра и амплитуды. Помехоустойчивость системы регулирования, как известно, можно повысить введением интегрирующих звеньев. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, что приращение статического значения показателя экстремума необходимо вычислять по приращениям сигнала от датчика, усредненным за цикл регулирования.

Пренебрегая для простоты инерционностью датчика (т. е. полагая  $\varphi = k_T \theta$ ), найдем с этой целью решение уравнения (5а) для  $n$ -го цикла регулирования:

$$\theta(t) = y_n - (y_n - \theta_{n-1}) e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad (n-1)T \leq t \leq nT \quad (13)$$

и проинтегрируем обе части (13) в пределах этого цикла

$$\int_{(n-1)T}^{nT} \theta(t) dt = j_{0n} = Ty_n + \tau_0(y_n - \theta_{n-1}) e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \tau_0(y_n - \theta_{n-1}).$$

Если принять за начало отсчета величины  $\theta$  в  $n$ -м цикле регулирования уровень  $\theta = \theta_{n-1}$ , то для площади, ограниченной кривой  $\theta(t)$ , отсчитанной от этого уровня, имеем

$$j_n = \int_{(n-1)T}^{nT} [\theta(t) - \theta_{n-1}] dt = j_{0n} - T\theta_{n-1} = (y_n - \theta_{n-1}) (T - \tau_0 + \tau_0 e^{-\frac{T}{\tau_0}}),$$

откуда, обозначив  $\psi(\tau) = T - \tau_0 + \tau_0 e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}$  находим  $y_n$  и  $y_{n-1}$ :

$$y_n = \frac{j_n + \theta_{n-1}\psi(\tau)}{\psi(\tau)}; \quad (14a)$$

$$y_{n-1} = \frac{j_{n-1} + \theta_{n-2}\psi(\tau)}{\psi(\tau)}. \quad (14б)$$

Решая совместно (6) и (14), получаем для приращения показателя экстремума

$$\Delta y_n = \frac{j_n - k_1 j_{n-1}}{\psi(\tau)}.$$

Исследованием поведения функции  $\phi_1(u) = ue^u - e^u - 1$  нетрудно убедиться, что  $\phi(\tau) > 0$ , поэтому алгоритм работы вычислительного устройства с релейным элементом на выходе принимает вид

$$\text{sign } \Delta y_n = \text{sign}(\beta_n - k_1 \beta_{n-1}),$$

где

$$\beta_i = k_T j_i = \int_{(i-1)T}^{iT} [\varphi(t) - \varphi_{i-1}] dt, \quad (i-1)T \leq t \leq iT.$$

Началом отсчета величины  $\varphi$  при интегрировании в  $i$ -м цикле регулирования является ее значение  $\varphi_{i-1}$  в начале этого цикла. В описанном в предыдущем параграфе вычислительном устройстве такой сдвиг начала отсчета получается автоматически.

Результаты проведенных исследований нашли практическое применение на ряде заводов, и в настоящее время осваивается серийный выпуск экстремальных регуляторов с описанным вычислительным устройством.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Казакевич. О процессе экстремального регулирования инерционных объектов при наличии возмущений. Труды I конгресса ИФАК в Москве, 1960. Изд-во АН СССР, 1961.
2. О. М. Крыжановский, В. Я. Солтык. О прерывных системах регулирования с улучшенными динамическими свойствами. «Автоматика», № 4, 1960.
3. А. А. Волков. Цифровые вычислительные устройства для управления объектами с экстремальными характеристиками. Сб. «Приборы промышленного контроля и средств автоматизации», Киев, 1963.
4. А. Г. Ивахненко. Сравнение кибернетических экстремальных импульсных систем, отличающихся стратегией поиска экстремума. «Автоматика», № 3, 1961.
5. Я. З. Цыпкин. Теория импульсных систем. Физматгиз, 1958.
6. В. М. Кунцевич. Системы экстремального управления. Госгортехиздат, Киев, 1961.
7. О. Р. Савин, В. И. Зенкин. Экстремальный регулятор шагового типа для инерционных процессов. Авторское свидетельство № 158 005, Бюллетень изобретений № 21, 1963.
8. О. Р. Савин, В. И. Зенкин, В. А. Постой, М. А. Аверков, А. С. Гольденберг, В. И. Мордань, Е. И. Семикин, А. Я. Кравченко. Регулирование температуры нагревательных колодцев с помощью экстремального регулятора ЭРЭМ-1. Сб. «Приборы промышленного контроля и средства автоматизации», Киев, 1963.
9. В. Я. Солтык. Экстремальный регулятор медленно изменяющихся технологических процессов. «Автоматика и приборостроение», № 3, 1961.
10. О. Р. Савин. Об улучшении качества экстремального регулирования инерционных процессов. «Автоматика», № 2, 1964.