НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЛОКА МОЩНОСТЬЮ 200 *МВТ* ПРИ ПОМОЩИ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

М. А. Дуэль, А. Х. Горелик, А. Ю. Гопп, Г. П. Комаров

Харьков

На блоке «котел ТП-100—турбина К-200-130» мощностью 200 *Мвт* Змиевской ГРЭС установлена разработанная и изготовленная ЦНИИКА система комплексной автоматизации типа «Комплекс» [1] с применением управляющей вычислительной машины (УВМ).

С помощью УВМ осуществляется непосредственное цифровое автоматическое регулирование 17 контуров регулирования основных технологических параметров блока: температуры первичного и вторичного пара за котлом, температуры пара за ширмами, давления пара и расхода воздуха при работе блока на газе и угле и разрежения в топке. Регуляторы температуры пара длительное время находились в непрерывной эксплуатации. Регуляторы процесса горения были налажены и опробованы при работе блока на газе, а в настоящее время производится их наладка при работе на угле. В связи с этим в статье рассматривается только работа регулятора температуры пара, по которым уже имеется некоторый опыт эксплуатации.

УВМ системы «Комплекс» состоит из двух функциональных частей — информационной (ИЧ) и вычислительной (ВЧ). ИЧ представляет собой машину централизованного контроля, сигнализации, регистрации и управления, которая преобразует сигналы от датчиков технологических параметров в цифровую форму и выдает сигналы управления на исполнительные механизмы регулирующих органов. Период опроса датчиков $T_0=1{,}5$ *сек*, а регулирующих органов — 0,128 *сек*. Точность оцифровки входного сигнала (величина кванта по уровню) — $q=0{,}1\%$ от шкалы датчика. Для рассматриваемых контуров регулирования температуры пара это составляет 0,6° С. Управление исполнительными механизмами осуществляется по схеме с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) [2].

ВЧ УВМ представляет собой универсальную вычислительную машину, предназначенную для обработки информации, поступающей из ИЧ, через общее для них запоминающее устройство (ЗУ). Обработка информации производится с периодом $T=2^n T_0 (n=0, 1, 2,...)$ в соответствии с алгоритмами, заложенными в ЗУ. В УВМ используются два типа ЗУ: оперативное (ОЗУ) и постоянное (ПЗУ), емкостью по 409 625 разрядных слов каждое. ОЗУ служит для хранения оперативной (периодически возобновляемой) информации, а ПЗУ — для программ, стандартных подпрограмм, различных констант и коэффициентов.

Существующие типовые схемы регулирования блока предусматривают использование линейных непрерывных пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов с введением дополнительных реальных дифференцирующих (Д) звеньев, дифференциальные уравнения которых имеют вид

$$y^{\text{ПИ}} = k_{\text{р}}\left(1+\frac{1}{T_{\text{и}}}\int x\,dt\right); \qquad (1)$$

$$y^{\text{Д}} = k_{\text{Д}} T_{\text{Д}} \frac{dx}{dt} - T_{\text{Д}} \frac{dy^{\text{Д}}}{dt},$$

где $y^{\text{ПИ}}$, $y^{\text{Д}}$ — соответственно выходные сигналы ПИ и Д звеньев;
x — входной регулируемый параметр;
$k_{\text{р}}$, $k_{\text{Д}}$, $T_{\text{и}}$, $T_{\text{Д}}$ — коэффициенты настроек линейных непрерывных регуляторов.

При построении схем цифрового регулирования возникает задача аппроксимации этих законов в УВМ. Целесообразность аппроксимации стандартных линейных законов с заданной точностью обусловлена стремлением получить в цифровой системе регулирования характеристики, близкие к оптимальным характеристикам соответствующей непрерывной системы с тем же объектом регулирования и для тех же возмущающих воздействий.

Формулы аппроксимации без учета эффекта квантования по уровню могут быть получены из интерполяционного полинома Ньютона, определяющего значение сигнала $v(t)$ в промежутках между его дискретами $v(0)$, $v(T)$, ..., $v(iT)$.

Так как требуется определить значение $v(t)$ после очередного замера, то, воспользовавшись вторым полиномом Ньютона [3], получаем

$$v(t) \cong v^*[(i+\rho)T] = v[iT] + \rho\Delta v[(i-1)T] + \frac{\rho(\rho+1)}{2!}\Delta^2 v[(i-2)T] + \ldots, \qquad (2)$$

где

$$\rho = \frac{t-iT}{T};\quad \Delta v[(i-1)T] = v[iT] - v[(i-1)T];$$

$$\Delta^n v[(1-n)T] = \Delta^{n-1} v[(i-n+1)T] - \Delta^{n-1} v[(i-n)T].$$

Линейные операторы над функцией $v(t)$ аппроксимируются преобразованием того же оператора над интерполяционным полиномом (2), поэтому нетрудно получить аппроксимирующие выражения для законов регулирования (1). Сложность формул аппроксимации определяется числом членов интерполяционного полинома. При использовании одного члена полинома Ньютона получаем *

$$y^{\text{ПИ}}[iT] = a_0 x[iT] + a_1 x[(i-1)T];$$

$$y^{\text{Д}}[iT] = a_0' \{x[iT] - x[(i-1)T]\} + b_1 y^{\text{Д}}[(i-1)T], \qquad (3)$$

где

$$a_0 = k_{\text{р}}\left(1 + \frac{T}{T_{\text{и}}}\right);\ a_1 = -k_{\text{р}};\ a_0' = \frac{k_{\text{Д}} T_{\text{Д}}}{T + T_{\text{Д}}};\ \ b_1 = \frac{T_{\text{Д}}}{T + T_{\text{Д}}}. \qquad (4)$$

Более сложные методы аппроксимации обеспечивают бо́льшую точность при той же величине периода T, однако при этом возрастает число расчетов, объем требуемой памяти, а на результаты расчетов значительнее влияют случайные ошибки при измерении входных сигналов [3]. Поэтому в УВМ программы работы предусматривают реализацию алгоритмов (3).

Если известны коэффициенты настроек линейного непрерывного регулятора (1), то из (4) можно определить все настройки цифрового регулятора. Период T выбирается, согласно [4, 5], как функция частоты среза ω_0 объекта регулирования или отношения $\frac{T}{T_{\text{и}}}$ и $\frac{T}{T_{\text{Д}}}$. Полученные таким образом коэффициенты настроек обеспечивают достаточно хорошее совпадение характеристик непрерывной и цифровой разомкнутых систем регулирования. Однако судить о качестве процесса регулирования цифровой системы можно, только проанализировав замкнутую систему. Экспериментальное исследование цифровой замкнутой системы регулирования позволяет, кроме того, одновременно учесть эффект квантования сигналов по уровню и нелинейности исполнительного устройства.

Рассмотрим теперь схемы регулирования температуры пара. Перегрев пара осуществляется в четырех параллельных симметричных нитках. Температура первичного пара по проекту регулируется впрыском собственного конденсата в рассечку ширм и в выходной пакет пароперегревателя. Однако по технологическим причинам конечный впрыск не включается, и температура пара за котлом при работе штатных регуляторов блока не регулируется. При изменении режимов работы блока температуру пара за котлом корректируют вручную, изменяя задание регуляторам температуры пара за ширмами. Температура вторичного пара регулируется байпасированием части пара через нагревательные поверхности.

При построении схемы цифрового регулирования температуры первичного пара за ширмами при помощи УВМ была осуществлена типовая двухконтурная схема регулирования [6] со скоростным импульсом (Д-звеном) по температуре пара за впрыском. Для автоматического регулирования температуры пара за котлом в схеме регулирования температуры пара за ширмами используется автоматический задатчик, который управляется корректирующим ПИ-регулятором по температуре пара за котлом. Структурная схема регулирования температуры первичного пара по одной из ниток приведена на рис. 1, *а*. Автоматический задатчик

* При выводе формулы (3) учитывалось, что исполнительный механизм, управляемый по схеме с ШИМ, является интегрирующим звеном [2]. Постоянная времени такого интегратора, определенная экспериментально, равна 0,7 *сек*.

выполнен на основе серийно выпускаемого задатчика ручного управления типа ЗРУ, на валу которого установлен реверсивный двигатель типа РД-09 с временем одного оборота 8 *сек*. Фрикционное соединение вала двигателя с рукояткой ЗРУ позволяет изменять задание по температуре пара за ширмами как вручную, так и автоматически.

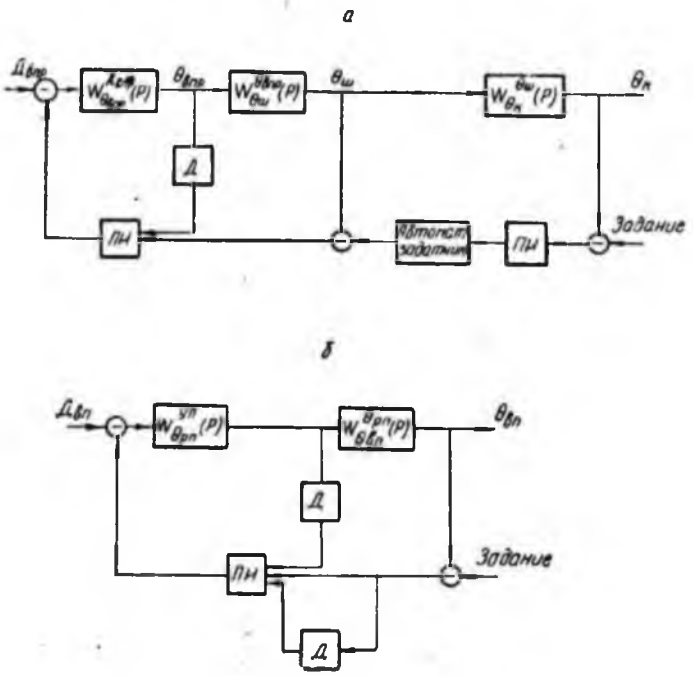


Рис. 1. Структурные схемы регулирования температуры первичного (*а*) и вторичного (*б*) пара.
$\theta_{впр}$; $\theta_ш$; $\theta_к$ — температура первичного пара за впрыском, за ширмами и за котлом соответственно; $W_{D_{впр}}^{\theta_{впр}}(p)$ передаточная функция по температуре пара за впрыском при возмущении расходом воды на впрыск; $W_{\theta_ш}^{\theta_{впр}}(p)$ $W_{\theta_к}^{\theta_ш}(p)$ — передаточные функции по температуре пара за ширмами и за котлом при возмущении температурой пара за впрысками и за ширмами соответственно; $\theta_{рп}$, $\theta_{вп}$ — температура вторичного пара за регулирующей поверхностью и за котлом соответственно; $W_{\theta_{рп}}^{y_п}(p)$— передаточная функция по температуре пара за регулирующей поверхностью при возмущении положением трехходового клапана; $W_{\theta_{вп}}^{\theta_{рп}}(p)$ — передаточная функция по температуре пара за котлом при возмущении температурой пара за регулирующей поверхностью.

Регулирование температуры вторичного пара также осуществляется по типовой схеме со скоростным импульсом по температуре пара за регулирующей поверхностью и дополнительным скоростным импульсом по температуре пара за котлом. Структурная схема регулирования температуры вторичного пара представлена на рис. 1, *б*.

Высококачественная настройка системы автоматического регулирования невозможна без знания динамических характеристик объекта регулирования. Эти характеристики были определены из разгонных характеристик, полученных при возмущении расходом воды на впрыск для температуры первичного пара и положением трехходового клапана для температуры вторичного пара. Передаточные функции для различных ниток несколько отличаются, поэтому приведем усредненные передаточные функции, которые для температуры первичного пара имеют вид

$$W^{Д_{впр}}_{\theta_{впр}}(p)=\frac{5,9}{(20p+1)^2}\frac{°C}{T\ ч};\quad W^{\theta_{впр}}_{\theta_{ш}}(p)=\frac{1,12}{(40p+1)^2}\frac{°C}{°C},\qquad (5)$$

$$W^{\theta_{ш}}_{\theta_{н}}(p)=\frac{0,91}{(30p+1)^3}\frac{°C}{°C}.$$

Передаточные функции для температуры вторичного пара

$$W^{УП}_{\theta_{рп}}(p)=\frac{1,7}{(20p+1)^3}\frac{°C}{\%УП};\qquad W^{\theta_{рп}}_{\theta_{вп}}(p)=\frac{0,59}{(150p+1)^3}\frac{°C}{°C},\qquad (5а)$$

где p — оператор преобразования Лапласа.

Коэффициенты настроек линейных регуляторов температуры первичного пара за ширмами (при отключенном корректирующем ПИ-регуляторе) и вторичного пара (без дополнительного Д-звена по температуре пара за котлом) можно определить по методике, изложенной в [6], используя передаточные функции (5) и (5а). Для регуляторов первичного пара они равны

$$k_р=0,2\frac{T/ч}{°C};\ T_и=19\ сек;\ k_Д=1,45;\ T_Д=56\ сек \qquad (6)$$

и для вторичного пара

$$k_р=1,5\frac{\%УП}{°C};\ T_и=20\ сек;\ k_Д=0,83;\ T_Д=195\ сек. \qquad (6а)$$

Подставив коэффициенты (6) и (6а) в (4), определим параметры настроек цифрового регулятора (3). Период расчета T установим согласно [4], используя передаточные функции (5) и (5а). Необходимо, однако, сделать дополнительные замечания о выборе T. Увеличение периода расчета приводит к уменьшению количества расчетов в УВМ и числа включений ИМ, что благоприятно сказывается на системе регулирования. Однако при этом увеличивается расхождение между характеристиками линейной и цифровой системы из-за ошибок аппроксимации и ухудшается качество переходного процесса [5] вследствие запаздывания появления регулирующего воздействия. В то же время уменьшение периода расчета приводит (при учете эффекта квантования по уровню) к искажению выполнения операции дифференцирования в УМВ [7], что также может быть причиной ухудшения качества регулирования. Поэтому период расчета T необходимо выбирать около максимально допустимого по точности аппроксимации значения. Для рассматриваемых двухконтурных систем регулирования (рис. 1) период расчета выбирали исходя из инерционности внутреннего контура $T=3$ *сек*.

Рассчитанные таким образом коэффициенты настройки были приняты предварительно при наладке цифровых регуляторов. Окончательно настройки выбирались экспериментально при внутренних возмущениях (возмущение расходом воды на впрыск или положением трехходового

клапана) и внешних возмущениях (изменением задания по температуре). За критерий оптимальной настройки принят показатель колебательности выходного регулируемого параметра $\Psi=0{,}9$ при минимальном времени переходного процесса. При этом большое внимание уделялось уменьшению числа включений исполнительного механизма, накладывающему ограничения на настройки цифровых регуляторов, особенно для внутренних контуров регулирования.

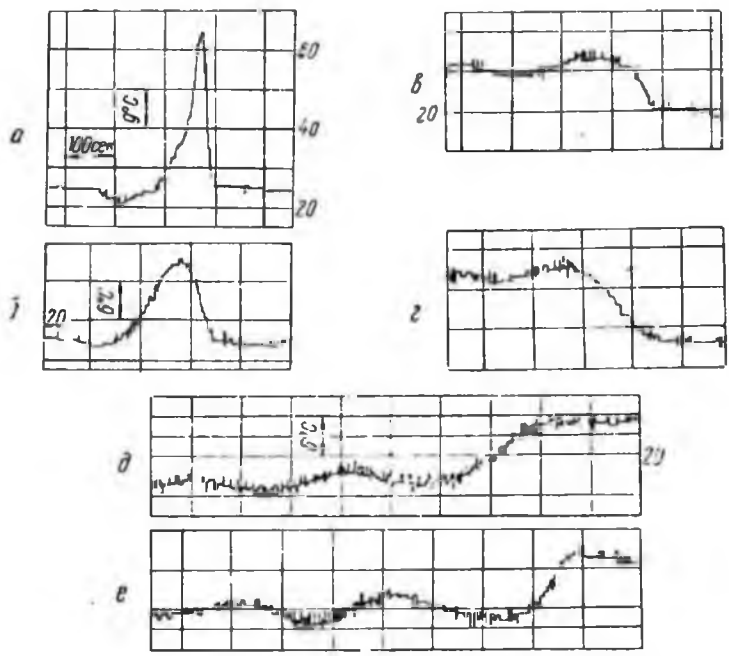


Рис. 2. Диаграммы переходных процессов при регулировании температуры первичного пара.
а, б — при возмущении расходом воды на впрыск (*а* — температура за впрыском, *б* — за ширмами); *в, г* — при изменении задания по температуре пара за ширмами (*в* — температура за впрыском, *г* — за ширмами); *д, е* — при изменении задания по температуре пара за котлом (*д* — температура за ширмами, *е* — за котлом).

Экспериментально определенные значения коэффициентов настроек цифровых регуляторов температуры пара за ширмами и вторичного пара при периоде расчета регулирующих воздействий $T=3$ *сек* и величине зоны нечувствительности исполнительного устройства $\delta=1{,}6\%$ [2] приведены в таблице. Отличие настроек цифровых регуляторов от расчетных объясняется в основном различием в передаточных функциях ниток пароперегревателей и расходных характеристик регулирующих органов.

Уменьшение произведения коэффициентов $k_p k_1$ по сравнению с расчетным вызвано стремлением уменьшить число включений ИМ в установившемся положении из-за произвольного изменения оцифровки регулируемых параметров.

Качество переходных процессов при регулировании температуры первичного пара за ширмами не хуже, чем при регулировании оптимально настроенными штатными регуляторами типа РПИК. Диаграммы переходных процессов при возмущении расходом воды на впрыск и изменении задания по температуре пара за ширмами по одной из ниток представлены на рис. 2, *а, г*.

Качество переходных процессов при регулировании температуры вторичного пара при больших возмущениях удовлетворительное, однако вблизи положения равновесия наблюдается появление автоколебаний с амплитудой до 5° С и периодом 15—20 *мин*. Возникновение их объясняется тем, что инерционность внешнего контура регулирования значитель-

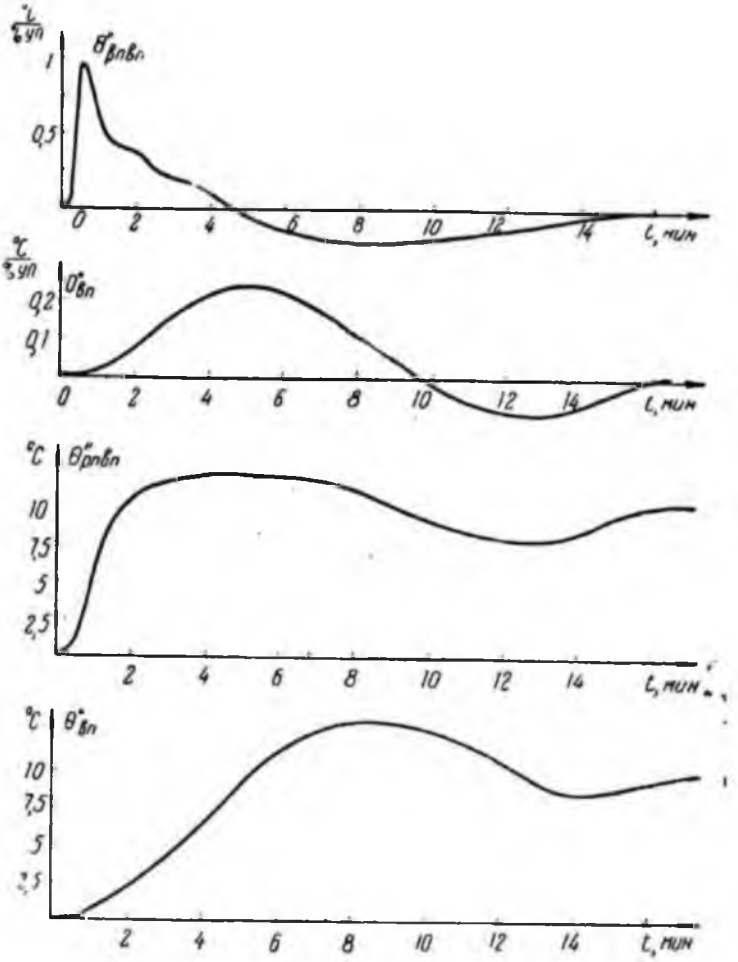


Рис. 3. Графики переходных процессов при регулировании температуры вторичного пара.
а, б — при возмущении положением трехходового клапана. (*а* — температура за регулирующей поверхностью, *б* — за котлом); *в, г* — при изменении задания по температуре пара за котлом (*в* — температура за регулирующей поверхностью, *г* — за котлом).

но превышает инерционность внутреннего контура (см. уравнение (6а)). В этом случае период расчета $T=3$ *сек* оказывается слишком малым для внешнего контура, что приводит к искажению П-составляющей закона регулирования [7]. Для устранения автоколебаний пришлось значительно увеличить по сравнению с расчетным коэффициент $T_д$, а также ввести в схему регулирования дополнительный скоростной импульс по тем-

Коэффициенты настроек регуляторов *

Параметр	Нитки	a_0	a_1	a'_0	b_1	$k_р$	$T_и$	$k_Д$	$T_Д$
Первичный пар	№ 1	6,5	6	0,75	0,9531	0,2	25,2	0,787	61
	№ 2	10	9	0,75	0,9609	0,3	18,9	0,78	73,6
	№ 3	10	9	0,9375	0,9609	0,3	18,9	0,975	73,6
	№ 4	9	8	0,9375	0,9609	0,267	16,8	0,975	73,6
Вторичный пар	№ 1	6,5	6	0,625	0,9903	1,2	25,2	0,631	306
	№ 2	6,7	6,2	0,625	0,9903	1,28	25,9	0,631	306
	№ 3	6,5	6	0,625	0,9903	1,2	25,2	0,631	306
	№ 4	6,5	6	0,625	0,9903	1,2	25,2	0,631	306
Корректирующий ПИ-регулятор	№ 1	0,9687	0,9375	—	—	0,565	72	—	—
	№ 2	0,9687	0,9495	—	—	0,57	75	—	—
	№ 3	0,9687	0,9375	—	—	0,565	72	—	—
	№ 4	0,9687	0,9495	—	—	0,57	75	—	—

* При пересчете коэффициентов настроек непрерывных регуляторов учтена постоянная времени схемы с ШИМ, равная 0,7 *сек*.

пературе пара за котлом (см. рис. 1, *б*). Коэффициенты настроек этого Д-звена для всех ниток одинаковы и равны

$$k_Д = 1{,}5;\ T_Д = 12\ сек.$$

Графики переходных процессов при возмущении положением трехходового клапана и изменении задания по температуре вторичного пара приведены на рис. 3, *а, г*.

После настройки регуляторов температуры первичного пара за ширмами была проведена настройка корректирующих ПИ-регуляторов по температуре пара за котлом. Так как регулирование температуры пара за ширмами представляет независимую важную задачу, то настройки этих регуляторов не изменялись. Коэффициенты настроек корректирующих ПИ-регуляторов определялись экспериментально. Их значения при $T=3$ *сек* и зоне нечувствительности автоматического задатчика $\delta=0{,}8\%$ приведены в таблице. Диаграммы переходных процессов при изменении задания по температуре пара за котлом приведены на рис. 2, *д, е*.

После настройки регуляторы были включены в круглосуточную работу и опробованы при сниженных нагрузках, сбросах и наборе нагрузки. Оценивалось качество процесса регулирования при случайном характере возмущений. В установившемся режиме отклонение температуры пара от задания не превышает 2—3° С. При нагрузках 120—150 *Мвт* колебательность переходных процессов возрастает, однако регуляторы работоспособны. При скачкообразном сбросе и наборе нагрузки на 20 *Мвт* от 180 до 160 отклонения температуры пара от задания не превышали 8° С. Диаграммы переходных процессов для температуры первичного пара при нагружении блока представлены на рис. 4.

К настоящему времени УВМ проработала в режиме непосредственного цифрового регулирования температуры пара 1100 часов. Первые 530 часов были включены все 12 контуров регулирования, а затем из-за отсутствия диапазона регулирования были отключены все регуляторы температуры первичного пара. За время этих испытаний зафиксировано 6 полных отказов УВМ и 12 единичных сбоев по отдельным контурам

регулирования (под полным отказом УВМ подразумевается неисправность УВМ, требующая отключения всех контуров регулирования и исправления УВМ; под единичным сбоем — получение единичного неправильного расчета по одному из контуров регулирования, причем требуется временное отключение этого контура без исправления УВМ). Таким образом, наработка УВМ на полный отказ составляет 187 часов, а на единичный сбой — 93 часа.

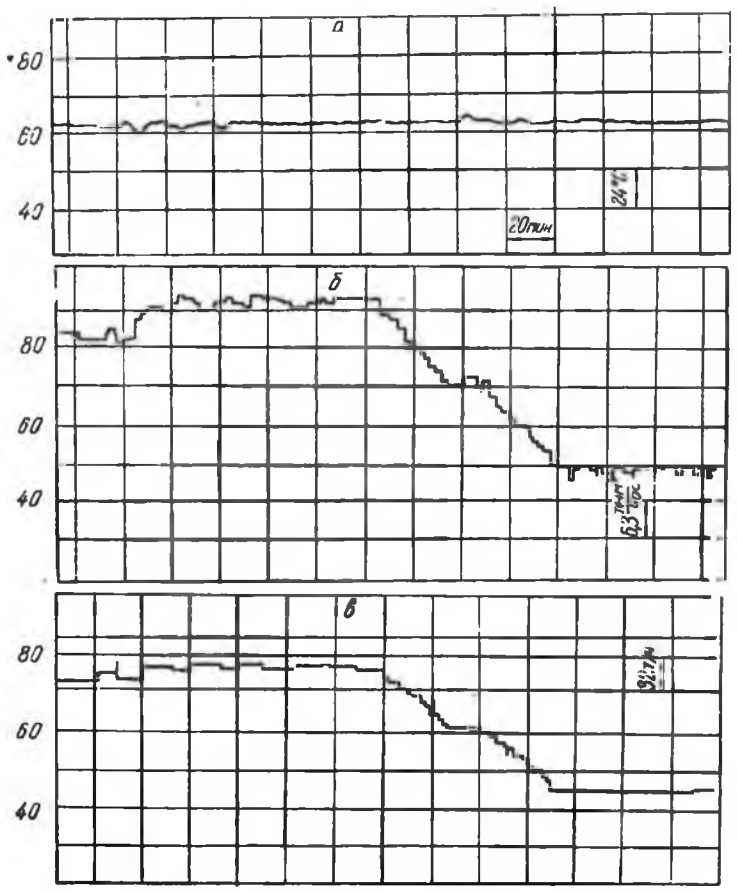


Рис. 4. Диаграммы переходных процессов при нагружении блока.
а — температура первичного пара за котлом; *б* — расход газа; *в* — расход пара.

Проведенное экспериментальное исследование систем автоматического цифрового регулирования температуры пара при помощи УВМ типа «Комплекс» подтвердило правильность решений, принятых при проектировании системы. Применение УВМ позволяет получить удовлетворительное качество процесса регулирования, однако надежность УВМ пока недостаточно высока.

Принятая аппроксимация законов регулирования, основанная на использовании одного члена полинома Ньютона, обеспечивает достаточную точность совпадения характеристик линейной и цифровой замкнутых систем регулирования. При построении двух- и многоконтурных систем регулирования желательно иметь возможность независимого изменения периода расчета T регулирующих воздействий по каждому контуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Дуэль. «Приборы и системы управления», № 7, 1967.
2. М. А. Дуэль, А. Ю. Гопп, А. Ф. Марьенко, Я. Г. Хаит. «Механизация и автоматизация управления», № 2, 1967.
3. К. Ланцош. Практические методы прикладного анализа. Физматгиз, 1961.
4. А. Ю. Гопп, Я. Г. Хаит, А. Е. Шульман. Аппроксимация законов регулирования в УВМ. Труды ЦНИИКА, вып. 21, 1969.
5. Е. К. Круг, Т. М. Александриди, С. Н. Дилигенский. Цифровые регуляторы. Изд-во «Энергия», 1966.
6. Н. Д. Александрова. «Теплоэнергетика», № 4, 1965.
7. А. Ю. Гопп, Е. Г. Мондрус, Я. Г. Хаит, А. Е. Шульман. Методы дифференцирования технологических параметров блока 200 *Мвт* при помощи УВМ системы «Комплекс». Тезисы доклада на научно-технической конференции «Развитие радиоэлектроники за 50 лет Советской власти», Харьков, 1967.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА КАРЬЕРЕ

А. И. Тупицын, Э. А. Чернин, В. Г. Легостаев

Харьков

Автоматизированная система управления технологическими процессами на карьере предназначена для повышения производительности работ по добыче и транспортировке горной массы (например, известня-

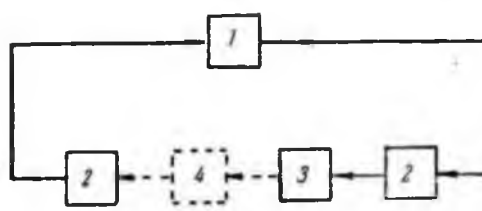


Рис. 1. Структурная схема системы диспетчерского управления технологическими процессами на карьере (*1* — объекты управления; *2* — система передачи информации; *3* — вычислительное устройство, *4* — диспетчер).

ка и породы) на дробильно-обогатительную фабрику (ДОФ) и в отвалы за счет увеличения оборачиваемости транспортных средств и более полного использования горнотранспортного оборудования: максимальной загрузки полустационарной дробилки предварительного дробления (ДПД), сокращения простоев транспорта и экскаваторов, т. е. за счет оптимальных по быстродействию процессов регулирования. Параметры регулирования: количество добытой экскаваторами горной массы, перевезенной породы и количество полезного ископаемого, загруженного в бункеры ДОФ и ДПД автосамосвалами. После дробления в ДПД полезное ископаемое по конвейеру поступает на фабрику для обогащения.

В рассматриваемой системе управления можно выделить два основных функциональных потока — материальный (добыча и транспортировка полезного ископаемого и породы) и информационный (сведения о ситуации на объектах, о погрузке, разгрузке, о наличии свободных транспортных средств и т. д.). Такая система может работать либо как советчик диспетчера (рис. 1) на карьере, если рекомендации вычислительного устройства передаются на добычные участки и транспортные средства через диспетчера, либо как система автоматического управления, если