

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Северо – Западный государственный заочный технический университет

В.В. Дембовский

Автоматизация управления производством

Учебное пособие

Санкт – Петербург

2004

Утверждено редакционно - издательским советом университета
УДК [658.52.011.56: 681.51: 621.74] (035).

Дембовский В.В. Автоматизация управления производством :
Учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2004.

Учебное пособие содержит материалы, посвященные основам теории автоматического управления, прикладным аспектам автоматизации металлургических процессов и элементам техники управления производственными процессами в литейных цехах.

Содержание учебного пособия соответствует требованиям рабочей программы и Государственного образовательного стандарта.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 651300 – “Металлургия”, специальность 110400 – “Литейное производство черных и цветных металлов” (специализация 110409 – “Литейное производство и экономика металлургии”) и для бакалавров по направлению 550500 – “Металлургия”.

Рецензенты:

- 1.Кафедра металлургии и литейного производства Северо-Западного государственного заочного технического университета (зав. кафедрой А.А.Яценко, канд. техн. наук, доц.);
- 2.Ткаченко С.С., Генеральный директор ПТИЛитпром, д-р техн. наук, заслуженный металлург Российской Федерации;
- 3.Сулягин Р.В., зам. директора Научно – исследовательского центра ТК «ОМЗ – Ижора», канд. техн. наук.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2004.

© Дембовский В.В., 2004.

Предисловие

Автоматика (от греческого *αυτοματος* – самодействующий) представляет собой научно-техническую отрасль, предметом которой являются методы и средства осуществления различных целенаправленных действий без непосредственного участия человека. В рассматриваемой области – металлургическом, в частности литейном производстве, такие действия чаще всего сводятся к управлению производственными объектами, под которыми подразумеваются оборудование для выполнения технологических процессов, а также ряд подъемно-транспортных и других машин и механизмов. При этом термин *управление* означает такое воздействие на технологический процесс, которое обеспечивает желаемое изменение его внутреннего состояния, а для подвижных объектов – перемещение по заданной траектории в пространстве и времени.

Автоматизация по существу является процессом превращения объектов, управляемых человеком, в те же объекты, управляемые с помощью автоматических устройств.

Технической базой автоматизации служит *механизация* производства, заменяющая физический труд человека. Однако если ограничиваются только механизацией, то за человеком сохраняются функции управления, представляющие продукт мыслительной деятельности рабочего, мастера, начальника смены (в общем случае – оператора). Автоматизация процессов управления в значительной степени освобождает персонал и от этих функций, обеспечивая при этом следующие преимущества:

1. Рост производительности труда;
2. Повышение качества продукции и её конкурентоспособности;
3. Сокращение затрат сырья, топлива, электроэнергии;
4. Повышение культуры производства;
5. Как правило, - сокращение численности производственного персонала.

Особую разновидность процессов управления представляет управление работой *коллективов людей*. В этой сфере человеческой деятельности также достигнуты значительные успехи, особенно – на основе широкого применения современных средств вычислительной техники, о чём будет сказано ниже.

Как общий итог перехода к автоматизации, повсеместно отмечается повышение технико-экономической эффективности производства в целом.

1. Важнейшие свойства систем управления и их общая классификация

При обобщенном подходе любая система управления содержит два основных звена (элемента):

- а) Технологический объект управления (ТОУ);
- б) Средство управления (СУ).

Под технологическим объектом управления (или, просто, - объектом) подразумевают любой агрегат или совершающийся в нём технологический процесс. С точки зрения решения задач автоматизации, объект воспринимается как некоторая данность, определяемая спецификой производства. В свою очередь, средство управления или некоторый комплекс таких средств общепромышленного или специального назначения в *системе автоматического управления (САУ)* призвано этот процесс осуществлять *без непосредственного участия человека*. Функции человека при этом сводятся к контролю за работой автоматических устройств, их наладке и настройке на требуемый процесс управления.

Общая классификация САУ может быть произведена по ряду признаков:

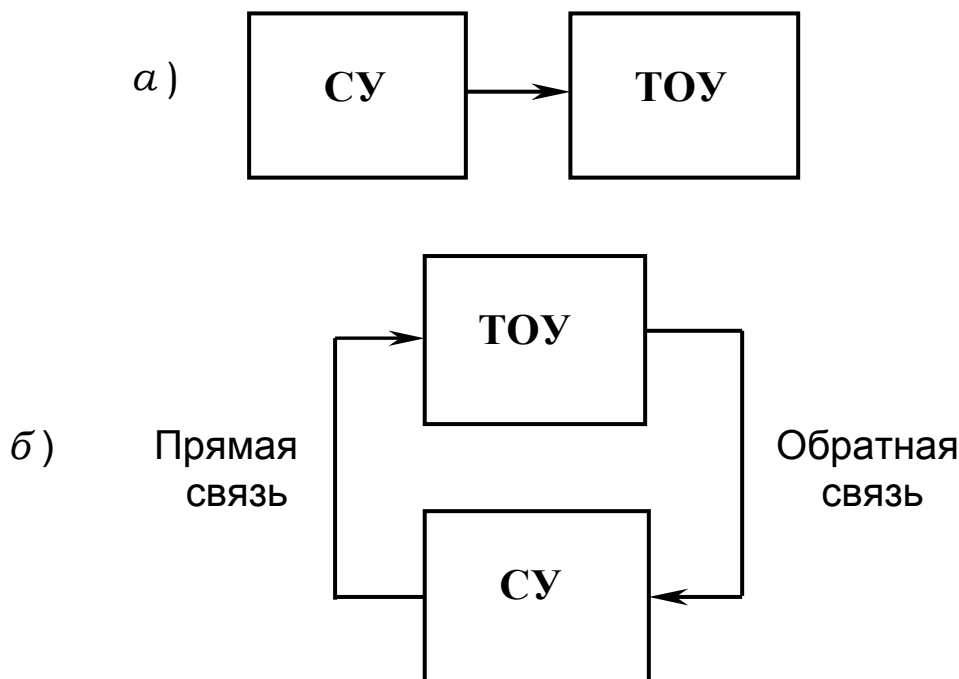


Рис. 1.1. Разомкнутая (а) и замкнутая (б) системы управления

1) По способу соединения средства управления и объекта различают системы разомкнутые и замкнутые. В *разомкнутой САУ* (рис.

1.1, а) средство управления (СУ) воздействует на объект (ТОУ) без учета состояния последнего. Такие системы применяются для выполнения простых функций, таких как пуск, остановка или реверсирование оборудования через заданные интервалы времени (управление по времени с помощью реле времени, или таймера) или – выполнение технологических операций в заданной их последовательности (программно-логическое управление с применением конечных выключателей или путевых переключателей, релейных схем, в том числе построенных на бесконтактных логических элементах) [1, с. 56...64].

Более сложными, но и более совершенными оказываются *замкнутые* системы (рис.1.1,б). Здесь в процессе работы средства управления (СУ) учитывается фактическое состояние объекта (ТОУ), и на этой основе вырабатываются необходимые воздействия на объект.

Информация о состоянии объекта поступает по каналу *обратной связи*, обычно реализуемой через контрольно-измерительные приборы. В свою очередь, управляющие воздействия передаются по каналу *прямой связи* с использованием различных исполнительных устройств.

2) По виду вспомогательной энергии, расходуемой на процесс управления, САУ подразделяются на электрические (в том числе, - электронные), гидравлические, пневматические и комбинированные.

3) По характеру передачи воздействий между звеньями встречаются системы *непрерывного и периодического* действия. Если воздействия передаются через заранее заданные интервалы времени, то системы называют *импульсными*.

По замкнутой схеме строятся, в частности, системы автоматического *регулирования* (САР).

Регулированиям принято называть такой частный вид управления, при котором *выход объекта* – основной технологический параметр – поддерживается вблизи заданного значения или изменяется по некоторому заданному закону.

Известны следующие разновидности САР:

а) *Стабилизирующие* системы, у которых заданное значение выхода объекта, устанавливаемое персоналом согласно технологии производства, сохраняется постоянным до следующего изменения, соответственно технологическим требованиям.

б) Системы *программного регулирования*, обеспечивающие изменение заданного значения выхода объекта по требуемому закону *во времени*;

в) Системы *оптимизирующего* регулирования, где необходимое значение выхода объекта заранее не задается, но в процессе работы системы путем пробного воздействия на объект в различных направлениях этот выход приводится к своему экстремуму (максимуму, или минимуму), в зависимости от особенностей объекта.

Средство управления в составе САР приобретает вид *автоматического регулятора*.

1. Функциональная блок-схема САР

Варианты построения системы авторегулирования (рис.2.1, а и б) различаются ролью в ней *вторичного измерительного прибора*.

В первом варианте (рис.2.1, а) этот прибор служит передаточным звеном в цепи обратной связи, а во втором (рис.2.1, б) – вынесен из замкнутого контура воздействий и сохраняет лишь *контрольные функции*. Как следует из ранее рассмотренного рис. 1.2, здесь состав звеньев САР проработан более детально (табл. 2.1.) – путь от простого к более сложному в процессе обучения.

На рис. 2.1, приняты следующие обозначения:

x_p – вход регулятора;

y_p – выход регулятора;

x_0 – управляемый вход объекта;

z – возмущение.

Под *возмущением* понимают любой фактор, воздействующий на объект извне (независимо от данной системы) и вызывающий отклонение выхода объекта от его заданного значения.

Промышленные образцы автоматических регуляторов обычно содержат в одном блоке *элемент сравнения и усилитель*. Элемент сравнения выявляет сигнал рассогласования заданного $y_{0з}$ и фактического y_0 значений выхода объекта. Этот сигнал служит *входом регулятора*

$$x_p = y_{0з} - y_0 . \quad (2.1)$$

Сигнал x_p усиливается с помощью усилителя до уровня, необходимого для приведения в действие исполнительного механизма. Последний осуществляет перемещение регулирующего органа для непосредственного воздействия на объект.

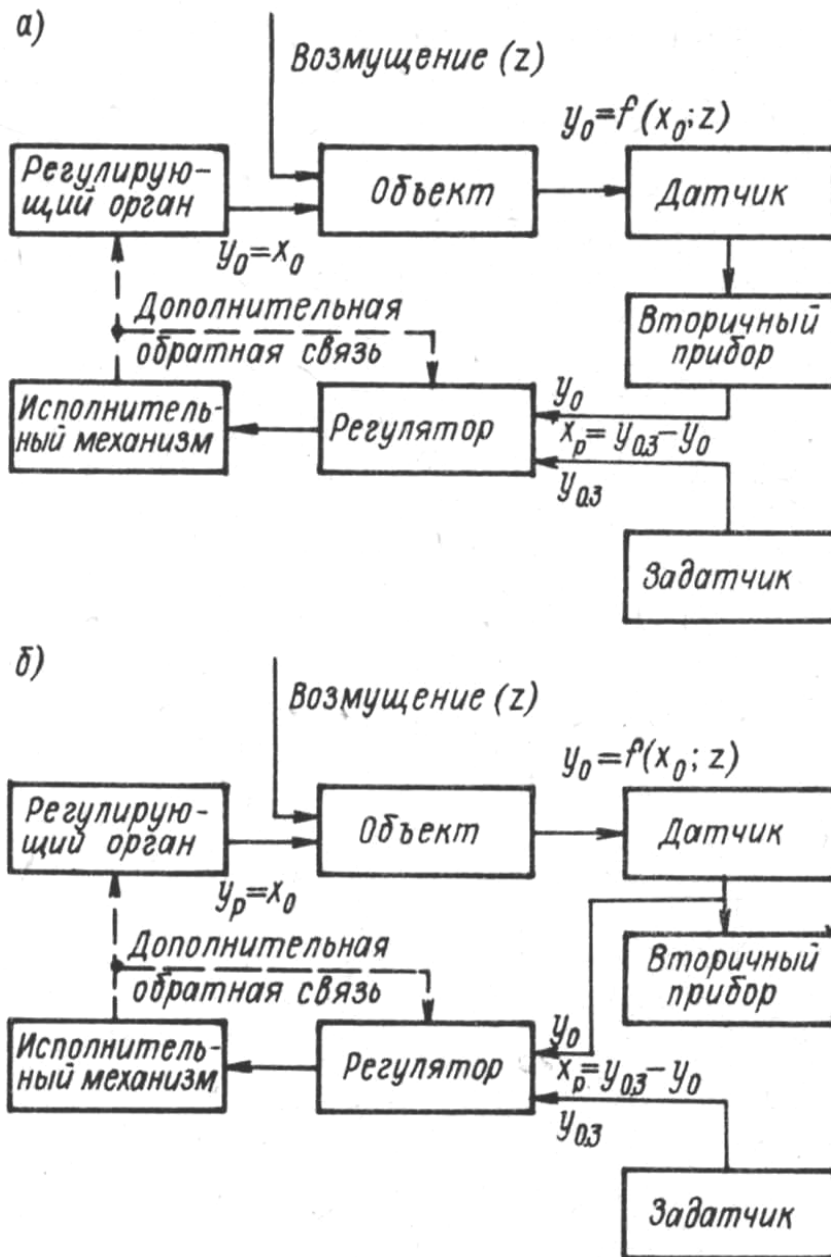


Рис.2.1 Функциональная блок – схема САР

Для лучшего понимания изложенного рассмотрим следующий, достаточно наглядный пример. Пусть объектом является некоторая металлургическая печь, отапливаемая газообразным топливом, предназначенная для нагрева или плавления металла. Выход такого объекта y_0 температура в рабочем пространстве печи.

Вообще этот выход зависит от расхода топлива, являющегося входом объекта x_0 .

Однако в процессе работы печи практически неизбежны технологические возмущения z в виде загрузки в печь свежих – холодных

Звенья САР и их общая характеристика

Звено 1	Выполняемые функции 2
Датчик (первичный измерительный прибор)	Измерение фактического значения выхода объекта с передачей соответствующего сигнала на вторичный прибор или непосредственно на регулятор
Вторичный измерительный прибор	Индикация или регистрация фактического значения выхода объекта
Задатчик (задающее устройство)	Формирование сигнала заданного значения выхода объекта.
Регулятор (функционально законченный блок).	Формирование воздействия на объект, часто с применением дополнительной обратной связи
Исполнительный механизм Регулирующий орган.	Привод регулирующего органа Реализация воздействия регулятора на вход объекта
Дополнительная обратная связь.	Формирование требуемого алгоритма (закона) регулирования.

порций металла, колебаний давления топлива и воздуха в заводских магистралях, возможных изменений качества топлива и пр. Поэтому для оценки выхода рассматриваемого объекта справедливо выражение:

$$y_0 = f_1(x_0, z, t), \quad (2.2)$$

где t – время.

Отклонения температуры от заданной по условиям нормального режима термообработки металла или плавки регулятор компенсирует соответствующим изменением расхода топлива (увеличением, если температура оказалась ниже заданной, и наоборот).

Регулирующим органом в этом случае служит дроссельная заслонка 1 в трубопроводе 2 подачи топлива в печь (рис.2.2).

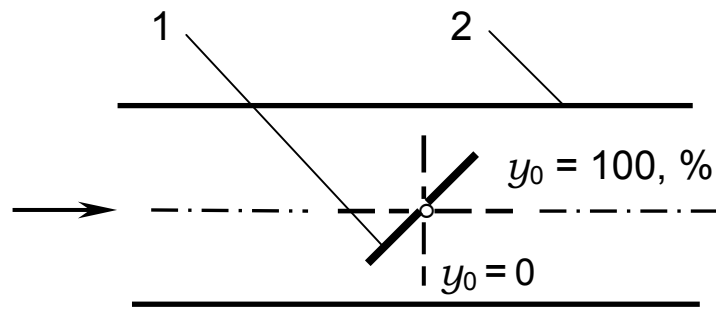


Рис.2.1. Пример регулирующего органа

Степень открытия заслонки в данном примере является выходом регулятора y_p . Если величины y_p и x_0 выражать в долях или процентах от их максимальных значений, то имеет место равенство:

$$y_p = x_0. \quad (2.3)$$

Для привода заслонки может быть использован любой из известных исполнительных механизмов:

- а) электрический (электродвигатель с выходным регулятором);
- б) гидро – или пневмоцилиндр, в котором поршень перемещается под давлением жидкости или сжатого воздуха, соответственно.

3. Свойства технологических объектов управления

В наиболее наглядной форме общее представление о свойствах объектов дают его *кривые разгона*, которые для наиболее часто встречающихся металлургических объектов представлены на рис. 3.1. Каждая из таких кривых является графиком изменения во времени выхода объекта – y_0 в ответ на ступенчатое изменение входа в начальный момент времени t_0 на величину Δx_0 .

Эти кривые могут быть сняты экспериментально – хронометрированием процесса изменения выхода отдельно взятого (без регулятора) объекта после приложения входного воздействия – включения подачи топлива в печь или замыкания рубильника в цепи электропитания при электрическом нагреве. Такой подход широко распространен при работе с металлургическими объектами, характерными своей сложностью и далеко не всегда определяемыми как причинно-следственными связями между составляющими их элементами, так и выделением отдельных звеньев из состава объекта.

В табл.3.1 представлены динамические параметры объектов в следующих условных обозначениях:

K_0 – передаточный коэффициент статического объекта, ед.вых./ед.вх.;

T – постоянная времени статического объекта первого порядка, ед.времени;

τ_0 – чистое запаздывание, ед.времени;

A_1, A_2 – коэффициенты;

\bar{K}_0 – условный передаточный коэффициент астатического объекта, ед.вых./(ед.вх.· ед.времени);

\bar{T} – условная постоянная времени астатического объекта, ед.вх.·ед.времени / ед.вых.;

T^* – постоянная времени «замедления» для астатического объекта, ед.времени;

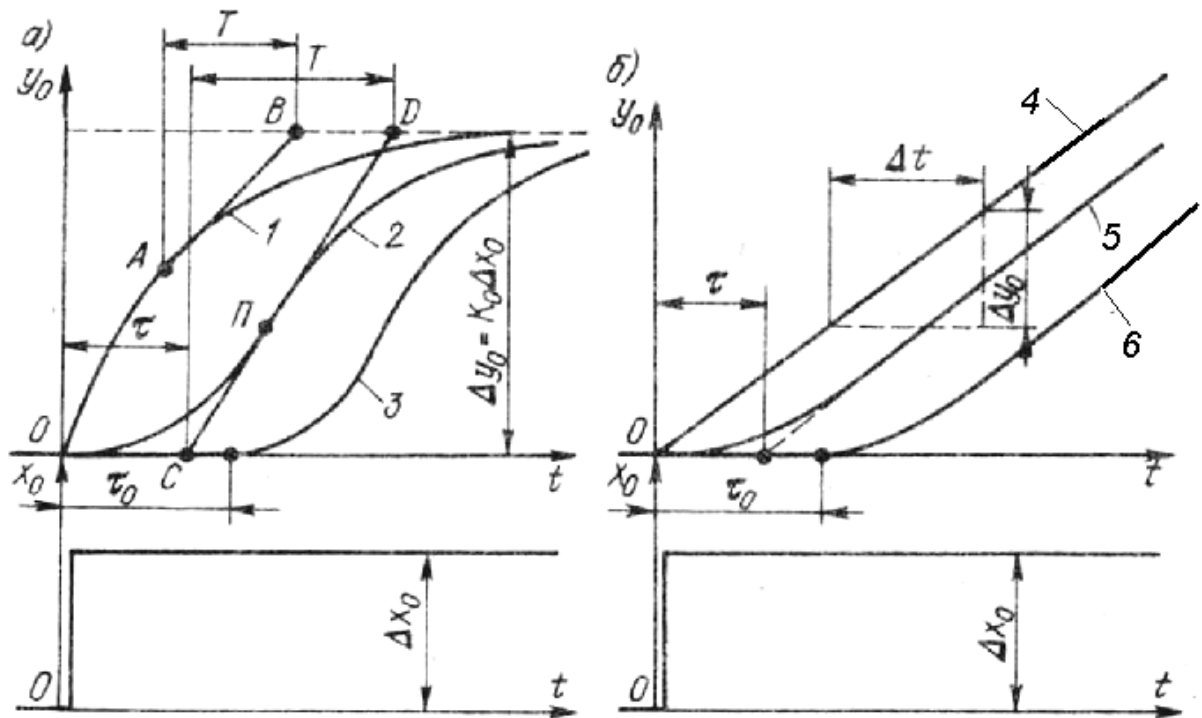


Рис. 3.1. Кривые разгона объектов

Каждой из кривых разгона 1 ... 6 (рис.3.1) соответствует определенное *дифференциальное уравнение* как динамическая математическая модель процесса изменения выхода объекта во времени [2], ч.2, с 71 ... 110. И обратно, – если известно дифференциальное уравнение объекта, то формулу кривой разгона всегда можно найти как решение данного дифференциального уравнения при нулевых (или иных) начальных условиях.

Сравнительная характеристика объектов

Объект	График кривой разгона	Дифференциальное уравнение объекта	Формула кривой разгона
Статический 1-го порядка	1 (рис. 3.1, а)	$T \frac{dy_0}{dt} + y_0 = K_0 \Delta x_0$ (A)	$y_0(t) = \Delta x_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}})$
Статический 2-го порядка	2 (рис.3.1, а)	$A_2 \frac{d^2 y_0(t)}{dt^2} + A_1 \frac{dy_0(t)}{dt} + y_0(t) = K_0 \Delta x_0(t - \tau_0)$ (B)	$y(t) = K_0 (1 - \frac{A_3}{A_3 - A_4} e^{-\frac{t}{A_3}} + \frac{A_4}{A_3 - A_4} e^{-\frac{t}{A_4}})$
То же – с чистым запаздыванием	3 (рис. 3.1, а)	$A_2 \frac{d^2 y_0(t)}{dt^2} + A_1 \frac{dy_0(t)}{dt} + y_0(t) = K_0 \Delta x_0(t - \tau_0)$ (C)	То же – со сдвигом на τ_0 по ходу времени относительно Δx_0
Астатический 1-го порядка	4 (рис.3.1, б)	$\bar{T} \frac{dy_0}{dt} = x_0$ (D)	$y(t) = \frac{\Delta x_0}{\bar{T}} t$
Астатический 2-го порядка	5 (рис.3.1, б)	$T^* \frac{d^2 y_0}{dt^2} + \frac{dy_0}{dt} = \bar{K}_0 x_0$ (E)	$y(t) = \bar{K}_0 \Delta x_0 [t - T^* (1 - e^{-\frac{t}{T^*}})]$
То же – с чистым запаздыванием	6 (рис.3.1, б)	$T^* \frac{d^2 y_0(t)}{dt^2} + \frac{dy_0(t)}{dt} = \bar{K}_0 \Delta x_0(t - \tau_0)$ (F)	То же – со сдвигом на τ_0 по ходу времени относительно Δx_0

При визуальной оценке кривых разгона в простых (скорее, - идеализированных) случаях возможный вид дифференциального уравнения определяется достаточно точно (табл. 3.1).

Характерным свойством *статических* объектов (рис. 3.1, а) является самопроизвольное стремление их выхода y_0 к некоторому *установившемуся* значению. Этого свойства лишены астатические объекты (рис. 3.1, б). Из сравнения дифференциальных уравнений *статических* и *астатических* объектов, например (A) и (D) вытекает *формальный признак астатизма* – отсутствие свободного члена y_0 (не содержащего производных выхода объекта) в левой части уравнения.

Передаточные коэффициенты статических объектов выражают отношение полных изменений выхода и входа в установившемся состоянии

$$K_0 = \frac{\Delta y_0}{\Delta x_0}. \quad (3.1)$$

Постоянная времени статического объекта первого порядка характеризует скорость изменения выхода в переходном процессе. Если вернуться к рассмотренной ранее кривой 1 на рис.3.1,*a*, то можно ознакомиться с графическим приёмом определения постоянной времени по экспериментальной кривой разгона. Так, взяв произвольную точку *A* на этой кривой, построив в ней касательную *AC* и опустив из точки *A* перпендикуляр на линию конечного установившегося значения выхода объекта, находим значение постоянной времени в виде отрезка подкасательной *BC = T* совершенно независимо от положения точки *A*. Действительно, если рассмотреть лишь собственно экспоненциальную функцию

$$f(t) = e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.2)$$

как главную часть формулы кривой разгона (табл.3.1), например, в диапазоне $t = 0 \dots 15$ при $T = 5$ (рис.3.2), то в соответствии с данными рис.3.3 имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d f(x)}{dt} = e^{\left(-\frac{t}{T}\right)} \cdot \left(\frac{1}{T}\right). \quad (3.3)$$

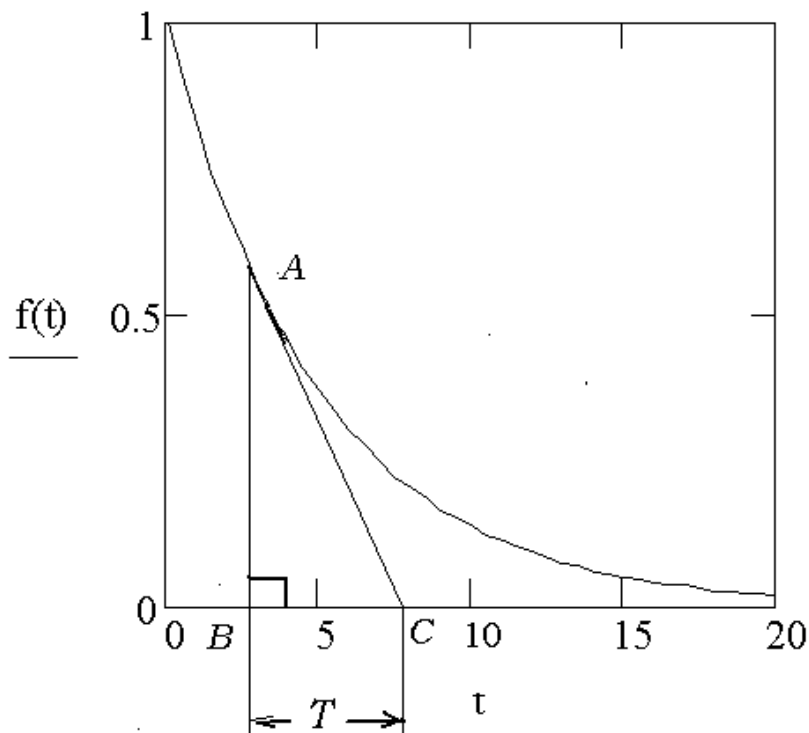


Рис.3.2. К определению постоянной времени статического объекта

В свою очередь,

$$\operatorname{tg} \beta = -\operatorname{tg} \alpha = e^{\left(\frac{-t}{T}\right)} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.4)$$

При этом в составе треугольника ABC катет AB есть текущее значение функции $f(t)$ (3.8). Отсюда при произвольном положении точки A следует

$$BC = \frac{AB}{\operatorname{tg} \beta} = T. \quad (3.5)$$

Чем больше постоянная времени, тем медленнее совершается переходный процесс, и наоборот. Полная длительность переходного процесса на статическом объекте первого порядка составляет $(3 \dots 5)T$.

В дифференциальном уравнении *астатического* объекта (D) параметр \bar{T} называют *условной постоянной времени* из-за смешанной размерности, где присутствуют не только единицы времени, но также единицы входа и выхода объекта. Иногда пользуются обратной величиной $\bar{K}_0 = 1/\bar{T}$ – *условным передаточным коэффициентом*. Величина \bar{T} также характеризует скорость изменения выхода в переходном процессе, однако эта скорость зависит также от значения входа объекта (табл.3.1) согласно уравнению (D). Отсюда в графической форме следует, что скорость нарастания выхода объекта (при положительном значении входа) действительно определяется величинами \bar{T} и Δx_0 :

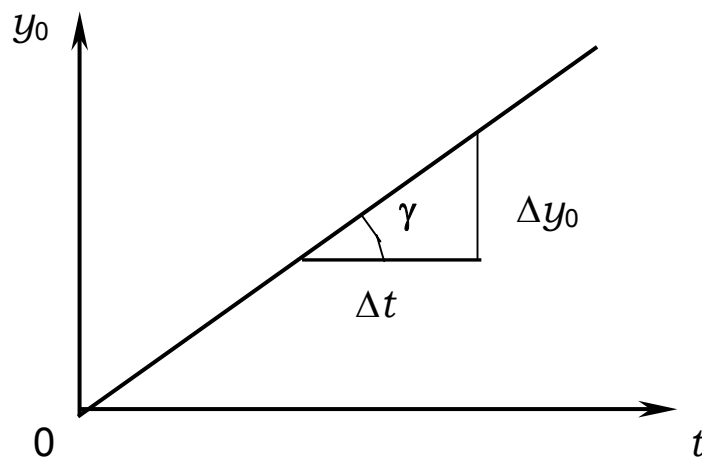


Рис.3.3. К определению условной постоянной времени астатического объекта

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta y_0}{\Delta t} = \frac{\Delta x_0}{T} \quad (3.6)$$

Что касается статических объектов *второго* (табл.3.1, уравнение (В), а также и более *высокого* порядка, то для них характерна *S* – образная форма кривых разгона (кривая 2 на рис. 3.1). В этом случае по виду экспериментальной кривой разгона точно определить порядок соответствующего дифференциального уравнения невозможно. Однако существуют расчетные методы идентификации объектов, среди которых известен *интегральный метод Симою* [3, с. 28...31], называемый также методом площадей. В то же время, ограниченная точность эксперимента по снятию кривой разгона не позволяет определить порядок дифференциального уравнения выше третьего.

Металлургические объекты ввиду их сложности (часто нелинейности и присутствия распределённых параметров) обычно аппроксимируют (то есть приближенно представляют) в виде объектов *первого* порядка с *переходным запаздыванием* τ_n .

Так, для *статических* объектов на полученной экспериментальной кривой разгона отыскивают точку перегиба П (см.рис.3.1, а, кривая 2) и строят в ней касательную *CD* к данной кривой до пересечения с линиями начального и конечного значений выхода объекта. Отрезки *OC* и *ED* соответственно принимают за переходное запаздывание τ_n и постоянную времени *T*.

У *астатических* объектов второго и более высоких порядков переходное запаздывание определяют так, как показано на рис. 3.1, б (кривая 5). Для объекта второго порядка с дифференциальным уравнением (Е) величина τ_n совпадает с постоянной времени «замедления» (см. с.11) T^* , описывающей начальную стадию переходного процесса. Однако при аппроксимации сложных астатических объектов с не всегда точно известным порядком дифференциального уравнения различия не делают и принимают $\tau_n = T^*$.

Если объекты обладают также и чистым запаздыванием τ_0 , обусловленным временем движения потока вещества по протяжённым коммуникациям, то при приближённом подходе, точность которого достаточна при решении инженерных задач, их суммарное запаздывание следует из выражения

$$\tau = \tau_n + \tau_0. \quad (3.7)$$

Рассмотрим теперь несколько достаточно простых примеров, иллюстрирующих представленные выше теоретические положения.

Примеры справедливы для тех случаев, когда искомые свойства объектов определяются аналитически.

Пример 1. Дано: термическая печь 1 (рис.3.4) на участке отжига отливок литейного цеха, в которой нагревают тонкостенную отливку 2 (система с сосредоточенными параметрами).

Найти: математическую модель объекта.

Решение

Для решения задачи используем метод составления мгновенного теплового баланса, уравнение которого составляется для бесконечно малого интервала времени dt и имеет вид [3], с. 9 ... 11:

$$Q_1 dt - Q_2 dt = c m d\theta \quad Q_1 dt - Q_2 dt = c m d\theta, \quad (3.8)$$

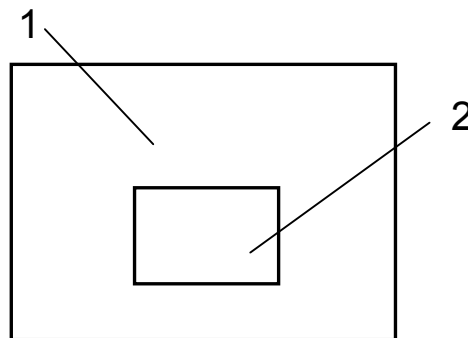


Рис. 3.4. Определение свойств статического объекта

где Q_1 - приход теплоты по отношению к отливке (излучением, конвекцией или их совместным действием со стороны печи) в единицу времени, кДж/с;

Q_2 - расход теплоты вследствие собственного теплового излучения отливки также в единицу времени, кДж/с;

c - удельная теплоемкость материала отливки, кДж/(кг·°С);

m - масса отливки, кг;

θ - текущая температура отливки, °С;

t - время, с;

Обратим внимание на то обстоятельство, что выражение (3.8), представляющее собой разность между приходом и расходом теп-

лоты, характеризует изменение запаса теплоты, аккумулированной отливкой за тот же интервал времени dt .

Отсюда скорость нагрева

$$c m \frac{d\theta}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (3.9)$$

Дополним (3.9) уравнением теплопередачи:

$$Q_1 - Q_2 = \alpha F (\theta_{\text{п}} - \theta), \quad (3.10)$$

где α - коэффициент теплоотдачи на поверхности отливки (в общем случае – суммарный, обеспечиваемый совместным действием как излучения, так и конвекции), кДж/(м² · °С);

F - поверхность отливки, м²;

θ - температура печи, °С.

Из уравнений (3.9), (3.10), получаем:

$$c m \frac{d\theta}{dt} + \alpha F \theta = \alpha F \theta_{\text{п}} \quad (3.11)$$

При составлении динамических моделей принято приводить дифференциальные уравнения к стандартной форме записи путем деления всех членов на коэффициент при выходе. Тогда наше уравнение приобретает вид:

$$\frac{c m}{\alpha F} \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_{\text{п}}, \quad (3.12)$$

где выражение

$$\frac{c m}{\alpha F} = T \quad (3.13)$$

есть не что иное, как постоянная времени данного объекта.

Отметим, что в данной системе «печь-отливка» температура θ последней является выходом (конечный показатель, характеризующий систему с точки зрения ведения технологического процесса), а температура печи $\theta_{\text{п}}$ – её входом, оказывающим активное воздействие на ход процесса нагрева.

Пример 2. Дано: система непрерывного литья (рис.3.5), где в водоохлаждаемый кристаллизатор 1 непрерывно подается расплав в количестве $Q_1, \text{м}^3 / \text{с}$ [3], с.11 ... 12. В результате интенсивных потерь теплоты в зонах первичного I и вторичного II охлаждения из расплава последовательно формируется непрерывный слиток 2. Последний с помощью привода, не показанного на рисунке, извлекается из кристаллизатора со скоростью $v, \text{м/с}$.

Найти: математическую модель поведения уровня расплава $h_{кр}, \text{м}$, в кристаллизаторе под воздействием технологических факторов.

Решение

Для решения поставленной задачи составим уравнение мгновенного материального баланса металла (сплава) в рассматриваемой системе, где приход расплава $Q_1, \text{м}^3/\text{с}$, а расход материала формирующегося слитка составляет $Q_2, \text{м}^3/\text{с}$.

Разность между секундным приходом и расходом представляет собой изменение запаса металла в кристаллизаторе

$$Q_1 \gamma_1 dt - Q_2 \gamma_2 dt = F \gamma_1 dh_{кр}, \quad (3.14)$$

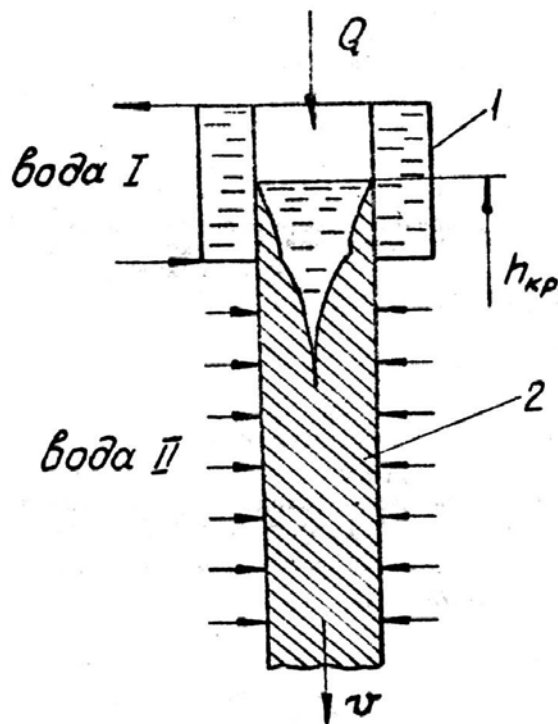


Рис.3.5. Схема процесса непрерывного литья

где γ_1 и γ_2 – плотности поступающего в кристаллизатор расплава и затвердевшего металла, кг / м³;

F – площадь поперечного сечения слитка, м².

Отсюда получаем математическую модель системы в виде уравнения

$$\gamma_1 \frac{dh_{\text{кр}}}{dt} = \gamma_1 Q_1 - \gamma_2 Q_2,$$

или

$$F \frac{dh_{\text{кр}}}{dt} = Q_1 - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} F v. \quad (3.15)$$

Здесь $h_{\text{кр}}$ – выход объекта, разность величин Q_1 и $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} F v$ – вход,

причем величины Q_1 и v в процессе литья изменяются независимо друг от друга, часто случайным образом под воздействием различного рода производственных помех (возмущений).

Роль условной постоянной времени у рассматриваемого объекта выполняет площадь поперечного сечения F слитка. Важно отметить, что математические модели (3.12) и (3.15) являются линейными, поскольку переменные и их производные входят в эти уравнения в первой степени, а коэффициенты – постоянные.

Заметим, что в представленных примерах для построения динамических моделей объектов аналитическим путем использован метод составления их мгновенных балансов: энергетического (пример 1) и материального (пример 2), то есть сопоставления статей прихода и расхода энергии или вещества за единицу времени или – за бесконечно малый промежуток времени.

Чистое запаздывание τ_0 представляет собой сдвиг реакции выхода объекта во времени относительно входного воздействия. Это явление встречается в системах, где материальный поток транспортируется по протяженным коммуникациям: транспортерам, трубопроводам, и т.п.

Пример 3. Дано: транспортер (рис.3.6), предназначенный для передачи сыпучего материала из бункера 1 в смеситель 4 на участке смесеприготовления литейного цеха.

Длина транспортера L , м, скорость движения его ленты 3, приводимой в движение электроприводом 5, составляет v , м / с.

Найти: математическую модель транспортёра.

Решение

Очевидно, что если в начальный момент времени $t = 0$ изменить степень открытия регулировочной заслонки 2 (например, приподнять ее), то расход материала с ленты в смеситель изменится после этого не сразу, а лишь спустя время, с

$$\tau_0 = \frac{L}{v} \quad (3.16)$$

Это время и является чистым запаздыванием, иногда в литературе называемым также транспортным.

Формула (3.16) носит общий характер и применяется для объектов любой природы.

С учетом чистого запаздывания идентифицируются представленные выше дифференциальные уравнения (С), (F) в табл.3.1.

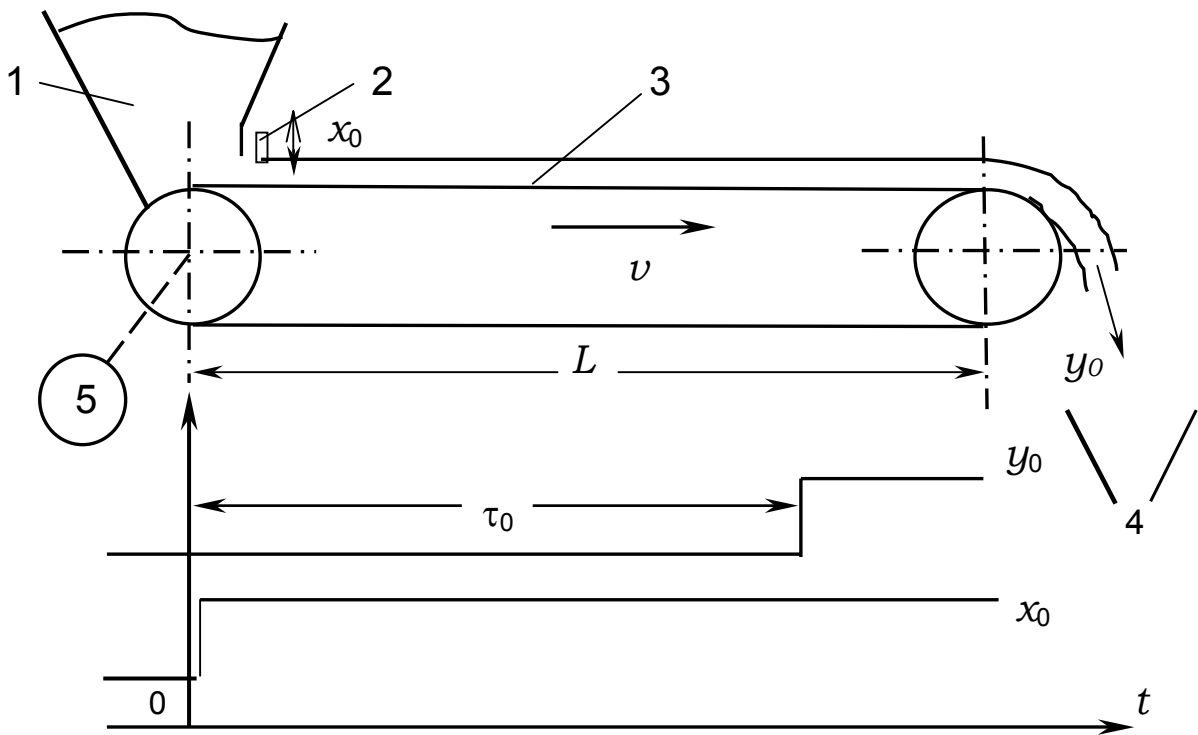


Рис.3.6. Схема транспортёра для передачи сыпучих материалов

Последнее применительно к системе непрерывного литья заготовок (см. пример 2) обусловлено временем течения расплава, например, из миксера электролитейного отделения цеха производства алюминия по желобу к кристаллизаторам.

Если в простых случаях удастся построить математическую модель металлургического объекта аналитически, то кривая разгона

представляет собой график общего решения дифференциального уравнения при принятых начальных условиях. Эти решения представлены выше в табл.3.1. Вообще же металлургические объекты могут описываться дифференциальными уравнениями и значительно более высокого порядка, вплоть до $n = 6 \dots 8$, которые в общей форме могут иметь вид:

А) Статические объекты

$$a_n \frac{d^{(n)}y_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{(n-1)}y_0}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{(n-2)}y_0}{dt^{n-2}} + a_1 \frac{dy_0}{dt} + a_0 y_0 = b_0 x_0.$$

Б) Астатические объекты

$$a_n \frac{d^{(n)}y_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{(n-1)}y_0}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{(n-2)}y_0}{dt^{n-2}} + a_1 \frac{dy_0}{dt} = b_0 x_0.$$

4. Свойства автоматических регуляторов

Важнейшим свойством любого регулятора является *алгоритм* (закон) регулирования

$$y_p = f_2(x_p; t). \quad (4.1)$$

Простейшим алгоритмом регулирования является *двухпозиционный*, называемый так потому, что регулирующий орган в зависимости от значения входа регулятора (см. выражение 2.1) может принимать только одно из двух возможных положений, или позиций. Одно из них соответствует максимальному открытию, например, заслонки на топливопроводе (рис. 2.1) или замыканию контактов в цепи электропитания установок электрического нагрева. Другое положение регулирующего органа отвечает минимальной подаче вещества или энергии в объект, в частности, - полному закрытию той же заслонки или размыканию упомянутых контактов.

Алгоритм двухпозиционного регулирования температуры $y_0 = \theta$, °С в рабочем пространстве печей типа электросопротивления (нелинейный) может быть выражен условием

$$\text{ЕСЛИ } \theta < \theta_{зд}, \text{ ТО } y_p = y_{p \max}; \quad \text{ИНАЧЕ } y_p = y_{p \min},$$

где $\theta_{зд}$ - заданное значение температуры, °С.

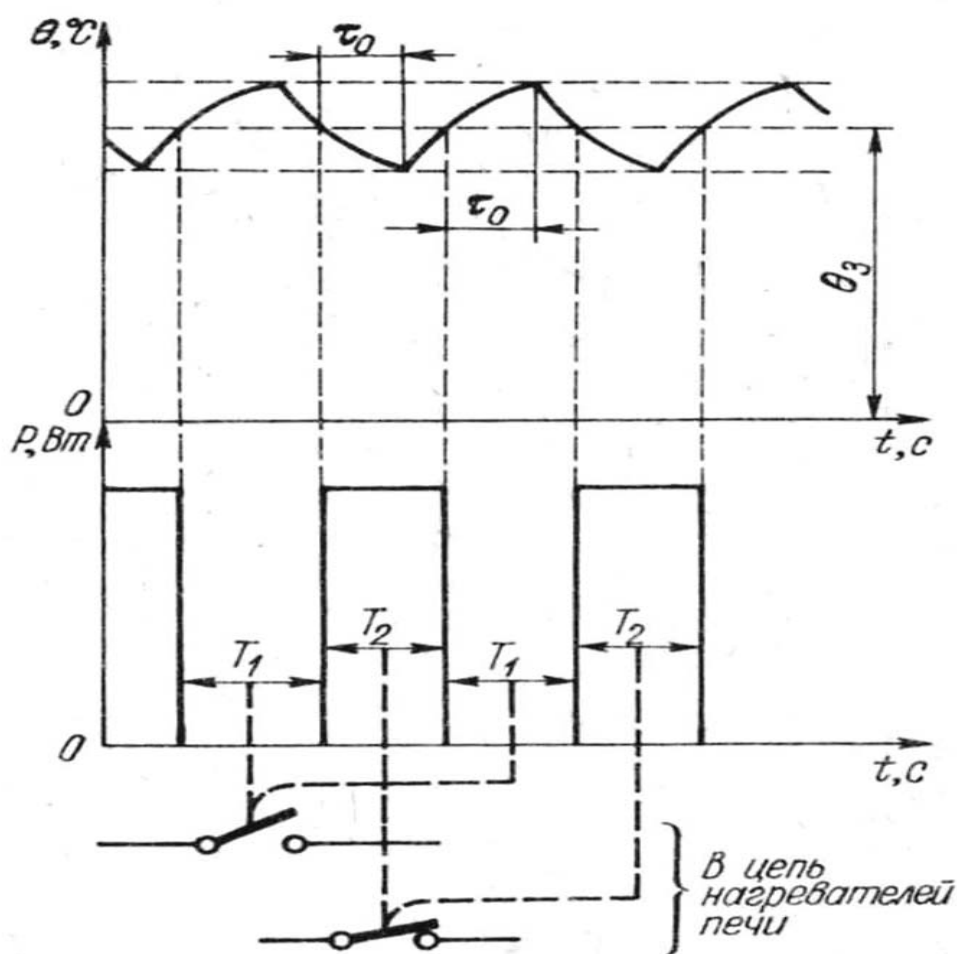


Рис.3.8. Автоколебательный режим системы двухпозиционного регулирования

В конструктивном отношении двухпозиционные регуляторы являются наиболее простыми и часто имеют вид электроконтактных устройств, встроенных во вторичные измерительные приборы. Вместе с тем выход объекта при таком способе авторегулирования не остается постоянным, а находится в автоколебательном режиме (рис. 3.8), периодически становясь то выше, то ниже своего заданного значения. Если это недопустимо, то иногда прибегают к трехпозиционному регулированию, где третья позиция регулирующего органа соответствует некоторому среднему значению входа объекта. Но такое решение не всегда обеспечивает высокую точность регулирования.

Другим, более эффективным, решением применительно к установкам электронагрева, например, миксерам для цветных металлов и сплавов, может служить обычное двухпозиционное регулирова-

ние температуры, но вместо полного отключения нагревателей в те периоды времени, когда температура выше заданной, производить переключение с “треугольника” (линейное напряжение 380 В) на “звезду” (фазовое напряжение 220 В).

При некотором сочетании запаздывания и постоянной времени неплохие результаты дает применение *трехпозиционного* регулирования той же температуры в печах типа электросопротивления. В этом случае задают два значения температуры $\theta_{зд \max}$ и $\theta_{зд \min}$. Регулирование осуществляют по схеме:

- 1) ЕСЛИ $\theta < \theta_{зд \min}$, ТО – “треугольник”;
- 2) ЕСЛИ $\theta_{зд \min} < \theta < \theta_{зд \max}$, ТО – “звезда”;
- 3) ЕСЛИ $\theta > \theta_{зд \max}$, ТО – “полное отключение печи”.

Но при этом фактическое значение температуры, например, в шахте миксера, определяется зоной $\theta_{зд \max} - \theta_{зд \min}$.

Характерным для двухпозиционного регулирования является несовпадение среднего фактического значения выхода объекта с заданным (ошибка среднего).

Амплитуда автоколебаний выхода объекта и ошибка среднего определяются свойствами объекта.

Для численного моделирования процессов двухпозиционного регулирования на различных объектах и с разным уровнем минимального значения входа объекта автором разработана специальная компьютерная программа под именем А1 в составе фонда алгоритмов и программ кафедры металлургии и литейного производства СЗТУ.

Более распространённые современные процессы авторегулирования реализуются с применением *линейных алгоритмов*. Характеристика стандартных линейных алгоритмов регулирования и соответствующих регуляторов непрерывного действия представлена в табл. 4.1.

Свойства идеального П - регулятора аналогичны свойствам статического объекта, не обладающего инерцией ($T = 0$), тогда как И - регулятор по своей характеристике повторяет свойства астатического объекта первого порядка.

Указанные в табл. 4.1 параметры настройки позволяют осуществлять настройку регуляторов на требуемый по технологическим соображениям процесс авторегулирования.

Высокая точность И - регуляторов объясняется тем, что их регулирующий орган, перемещаясь со скоростью

$$\frac{dy_0}{dt} = \bar{K}_p x_p, \quad (4.1)$$

действует до тех пор, пока не будет выполнено задание y_0 .

Почленное интегрирование последнего выражения дает оценку полного перемещения регулирующего органа

$$\Delta y_p = \int_0^t dy_p = \bar{K}_p \int_0^t x dt. \quad (4.2)$$

Оно отличается от действия Δy_p , совершаемого П - регулятором, что и ликвидирует статическую ошибку.

Пропорционально - интегральные (ПИ -) регуляторы (рис.4.1) сочетают в себе достоинства пропорциональных (П -) и интегральных (И -) регуляторов. Они могут применяться на любых объектах и обеспечивают высокую точность выполнения задания.

Кривая разгона ПИ-регулятора (рис.4.2) позволяет наглядно представить смысл такого параметра настройки его интегральной составляющей (компонента), как время удвоения T_y . За это время полное перемещение регулирующего органа Δy_p удваивается, по сравнению с тем, $(y_p)_п$, которое совершает только один – пропорциональный компонент регулятора.

Алгоритм ПИ-регулирования может записываться в любой из двух форм: “скобочной” (табл. 4.1) и “бесскобочной”

$$\Delta y_p = K_p x_p + \frac{1}{T_{и}} \int_0^t x_p dt, \quad (4.3)$$

где $\bar{T}_{и} = T_y / K_p$ – условная постоянная времени интегрирования.

Практически встречаются промышленные образцы автоматических регуляторов, которые используют не только непрерывный, но и импульсный режим действия. В непрерывном режиме обычно работает пропорциональная компонента регулятора, так как требуется обеспечить максимально возможную скорость исполнительного механизма. Импульсный же режим (рис. 4.2) оказывается удобным для настройки требуемой средней скорости исполнительного механизма путем включения его отдельными импульсами, следующими друг за другом с периодом П. Величина П оказывается в таком случае дополнительным параметром настройки, использование которого оказывается целесообразным для компенсации запаздывания объекта.

Линейные алгоритмы регулирования

Тип	Алгоритм регули-	Параметры настрой-
Пропорциональный (П)	$\Delta y_p = K_p x_p$	Передаточный коэффициент K_p
Интегральный (И)	$\Delta y_p = \bar{K}_p \int_0^t x_p dt$	Условный передаточный коэффициент \bar{K}_p
Пропорционально – интегральный (ПИ)	$\Delta y_p = K_p (x_p + \frac{1}{T_y} \int_0^t x_p dt)$	Передаточный коэффициент K_p и время удвоения T_y
Пропорционально – дифференциальный (ПД)	$\Delta y_0 = (K_p + T_{\pi} \frac{dx_p}{dt})$	Передаточный коэффициент K_p и время предварения T_{π}
Пропорционально – интегрально – дифференциальный (ПИД)	$\Delta y_p = K_p (x_p + \frac{1}{T_y} \int_0^t x_p dt + T_{\pi} \frac{dx_p}{dt})$	Передаточный коэффициент K_p , время удвоения T_y и время предварения T_{π} .

В состав линейных регуляторов может быть введен блок дополнительного (дифференцирующего – Д) воздействия на объект по первой производной его выхода. Это позволяет быстрее приводить выход объекта к его заданному значению, по сравнению с тем, когда регулятор чувствителен только к сигналу x_p . В результате реализуются алгоритмы ПД - и ПИД -регулирования. Однако они эффективны лишь для малоинерционных объектов, то есть объектов с малой постоянной времени и, следовательно, высокой скоростью изменения выхода.

Для численного моделирования переходных процессов может быть использована компьютерная программа АЗ (разработчик – автор), пригодная для любых объектов и различных линейных алгоритмов регулирования как непрерывного, так и импульсного действия.

Таблица 4.1

и их свойства

Кривая разгона регулятора	Область применения	Достоинства	Недостатки
	Любые объекты	Максимальное быстродействие	Наличие статической ошибки регулирования
	Статические объекты	Высокая статическая точность регулирования	Невозможность применения на астатических объектах
	Любые объекты, в том числе — со значительным чистым запаздыванием	Универсальность применения при высокой точности регулирования	Сложность устройства
	Любые объекты	Повышение динамической точности регулирования	Наличие статической ошибки; эффективность только на малоинерционных объектах
	То же	То же	Эффективность применения только на малоинерционных объектах

Программа позволяет моделировать переходные процессы, связанные с действием возмущения на объект или — с изменением задания.

Результаты моделирования обычно переносятся на действующие системы авторегулирования.

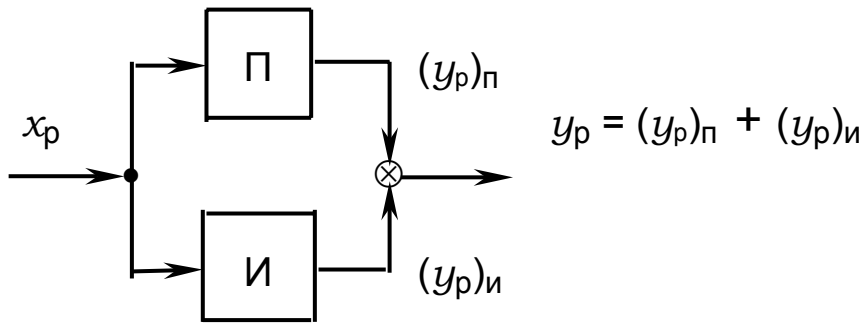


Рис.4.1. Структура ПИ – регулятора

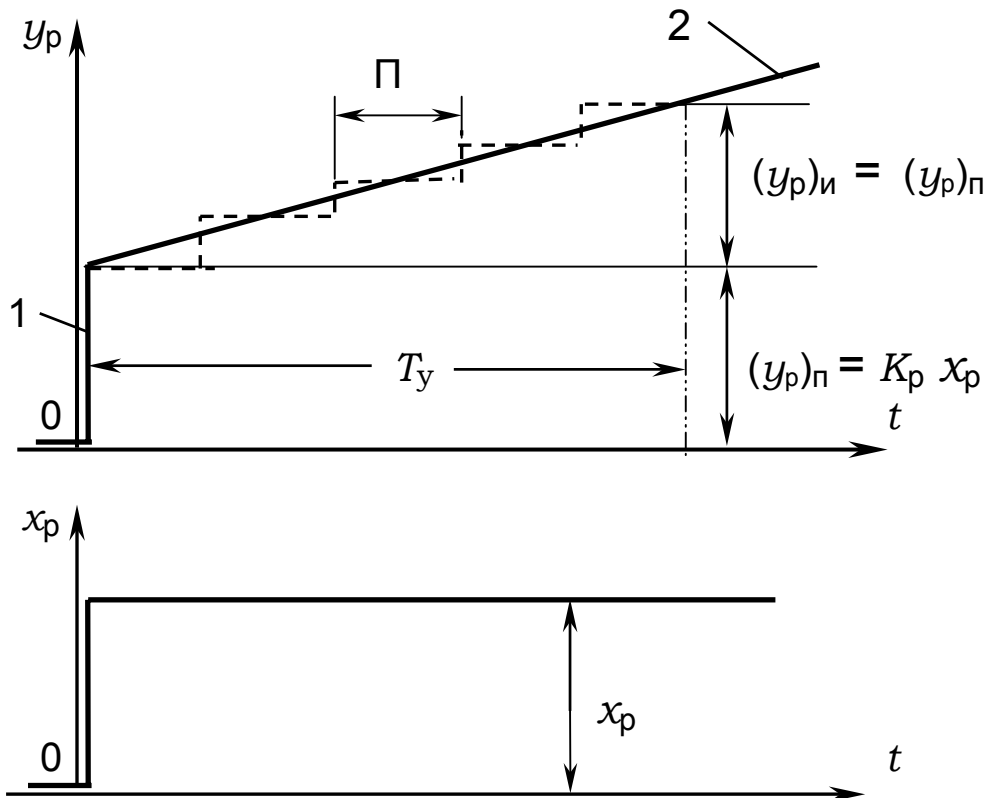


Рис.4.2. Кривая разгона ПИ – регулятора в режиме непрерывного действия (с этапами работы пропорционального 1 и интегрального 2 компонента, показанными сплошными линиями), а также – импульсный режим интегрального компонента (пунктир).

5. Преобразование интегро - дифференциальных уравнений в операторную форму. Понятие о передаточной функции

Для целей *анализа* (исследования) и *синтеза* (проектирования) САУ линейные уравнения, содержащие производные и (или) интегралы преобразуют в *операторную форму*, которая формально совпадает с преобразованием по Лапласу при нулевых начальных

условиях. При этом используются соотношения, известные из высшей математики (табл. 5.1). Здесь приняты обозначения:

t – аргумент (здесь – время);

$x = x(t)$ – произвольная функция;

$a = \text{const}$;

p – дифференциальный оператор, выражающий операцию взятия производной от записываемой за ним переменной величины.

Последнее – *интегральное* преобразование основано на том, что

Таблица 5.1.

Оригиналы и их изображения в операторной форме

Оригинал	Изображение
$\frac{dx}{dt}$	px
$a \frac{dx}{dt}$	apx
$a \frac{d^2x}{dt^2}$	ap^2x
...	...
$a \frac{d^{(n)}x}{dt^n}$	$ap^n x$
$a \int x dt$	$\frac{ax}{p}$

интегрирование есть действие, обратное дифференцированию.

С учетом этих соотношений дифференциальное уравнение, например вида

$$a_3 \frac{d^3y}{dt^3} + a_2 \frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (5.1)$$

в операторной форме запишется следующим образом:

$$(a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0)y = b_0x. \quad (5.2)$$

В соответствии с теоретическими основами преобразования Лапласа на дифференциальный оператор p при преобразовании дифференциальных уравнений распространяются все правила алгебраических действий.

Отсюда получаем выражение передаточной функции системы:

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_0}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}. \quad (5.3)$$

В стандартной форме записи путем сокращения числителя и знаменателя на a_0

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K}{A_3p^3 + A_2p^2 + A_1p + 1}, \quad (5.4)$$

где K – уже известный передаточный коэффициент.

Как это следует из уравнения (5.3) и (5.4), передаточная функция представляет собой отношение выхода и входа, взятых в операторной форме, то есть в динамике.

Если рассматривается статическая система, то после окончания в ней переходного процесса устанавливается равновесие при постоянных значениях входа и выхода. При этом производные в уравнении (5.1) становятся равными нулю, а дифференциальное уравнение динамической характеристики обращается в свою частную форму алгебраического уравнения статической характеристики

$$K = \frac{y}{x}. \quad (5.5)$$

Из уравнений (5.4) и (5.5) в состоянии равновесия следует

$$W(p) = K, \quad (5.6)$$

то есть передаточная функция в статике приобретает частный вид передаточного коэффициента. Последний согласно уравнению (5.5) является отношением выхода и входа, взятых в *натуральной форме* для случая равновесия системы.

Передаточная функция также может быть использована для определения временной функции (в том числе, кривой разгона) системы или её элементов на основании выражений

$$y(p) = W(p) \cdot x(p) \quad (5.6)$$

и

$$y(t) = L^{-1} [W(p) \cdot x(p)], \quad (5.7)$$

где L^{-1} символ обратного преобразования Лапласа.

Этот путь трудоёмкий, в особенности при необходимости получения множества результатов за короткое время, и при решении инженерных задач следует отдавать предпочтение численным методам и использованию ЭВМ.

6. Способы соединения элементов в системах

Существует три основных способа соединения элементов в системах: последовательное, параллельное и охватом элемента обратной связью.

6.1. Последовательное соединение

При последовательном соединении элементов (рис.6.1) выход каждого предыдущего из них оказывается входом последующего.

Для такой системы на основании формулы (5.6) имеют место следующие соотношения

$$\begin{aligned} y = y_n &= W_n(p) \cdot x_n = W_n(p) \cdot W_{n-1}(p) \cdot x_{n-1} = \\ &= W_n(p) \cdot W_{n-1}(p) \cdot \dots \cdot W_1(p) \cdot x_1 = W_c(p) \cdot x, \end{aligned}$$

где $W_c(p)$ – передаточная функция системы.

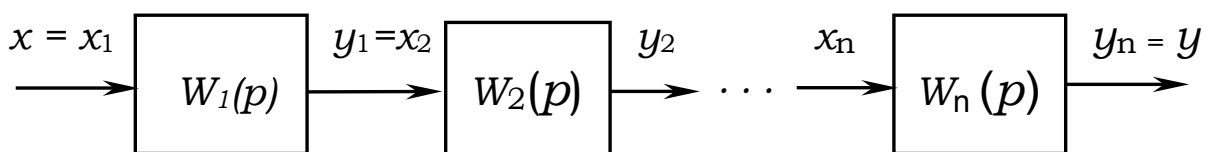


Рис.6.1. Схема последовательного соединения звеньев

В сокращённой форме полученное выражение записывают так

$$W_c(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (6.1)$$

Для статической системы согласно выражению (6.1), распространённому на каждые из составляющих элементов, аналогично определяется передаточный коэффициент

$$K_c = \prod_{i=1}^n K_i. \quad (6.2)$$

6.2. Параллельное соединение элементов

Этот вид соединения характерен тем, что на каждый из элементов (рис. 6.2) оказывается одно и то же входное воздействие, а выходы всех элементов суммируются. Так как выражение (5.6) остаётся справедливым для любого способа соединения, можно использовать подстановку

$$y_i = W_i(p) \cdot x_i,$$

тогда получим

$$y = x \sum_{i=1}^n W_i(p) = W_c(p) \cdot x.$$

где выражение

$$W_c(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p) \quad (6.3)$$

является передаточной функцией системы для данного способа соединения.

Аналогично в статике

$$K_c = \sum_{i=1}^n K_i. \quad (6.4)$$

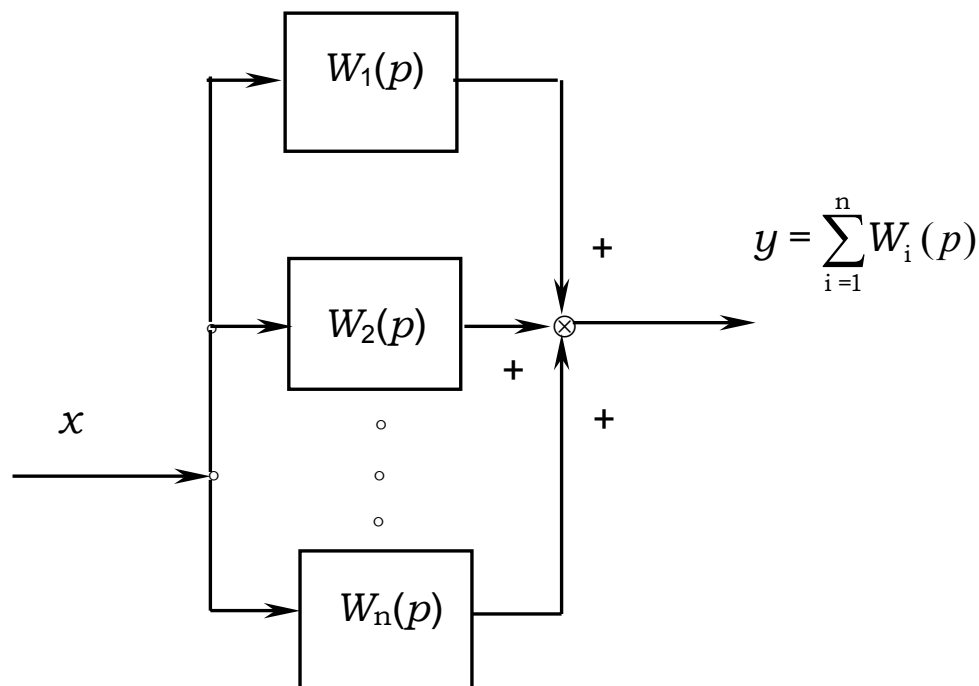


Рис.6.2. Схема параллельного соединения звеньев

6.3. Охват элемента обратной связью

Сущность обратной связи (рис.6.3) заключается в том, что выход y основного звена с передаточной функцией $W_1(p)$ через звено обратной связи $W_{oc}(p)$ сообщается на вход системы, где алгебраически суммируются с внешним входным воздействием x . В результате этого непосредственно на входе основного звена имеем:

$$x_1 = x \pm y_{oc}, \quad (6.5)$$

где сигнал обратной связи

$$y_{oc} = W_{oc}(p) \cdot x. \quad (6.6)$$

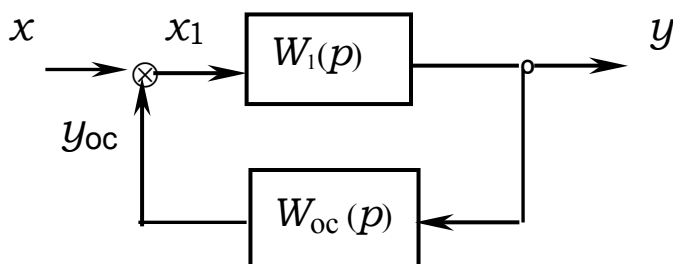


Рис.6.3. Схема охвата звена обратной связью.

Так как в любом случае

$$y = W_1(p) \cdot x_1,$$

то с учетом (6.5) и (6.6) приходим к следующим соотношениям:

$$y = W_1(p) \cdot [x \pm W_{oc}(p) \cdot y],$$

$$y = W_1(p) \cdot x \pm W_1(p) \cdot W_{oc}(p) \cdot y,$$

откуда

$$y = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) \cdot W_{oc}(p)} \cdot x.$$

Здесь передаточная функция системы

$$W_c(p) = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) \cdot W_{oc}(p)}, \quad (6.7)$$

причём в знаменателе знак (–) соответствует положительной, а знак (+) отрицательной обратным связям.

Соответственно этому в статике становится справедливым правило

$$K_c = \frac{K_1}{1 + K_1 \cdot K_{oc}}, \quad (6.8)$$

где K_1 и K_{oc} – передаточные коэффициенты основного элемента и элемента обратной связи соответственно.

6.4. Учет чистого запаздывания

Как уже отмечалось (см. с.18), чистое запаздывание представляет собой сдвиг реакции выхода системы во времени относительно входного воздействия. Это явление встречается в системах, где материальный поток транспортируется по протяженным в пространстве коммуникациям: транспортерам, трубопроводам, шнековым питателям и т.п. Значение чистого запаздывания определяется формулой (3.22), что и использовалось нами при общем подходе к этому вопросу (см. табл.3.1). Однако в конкретных расчётах, свя-

занных с использованием передаточных функций, теория преобразования Лапласа даёт удобное правило учёта чистого запаздывания, согласно которому передаточная функция системы с чистым запаздыванием

$$W_c(p) = W_c^*(p) \cdot e^{-\tau_0 p}, \quad (6.9)$$

где $W_c^*(p)$ – передаточная функция той же системы без учёта чистого запаздывания.

Сказанное позволяет определить действительные или аппроксимированные передаточные функции часто встречающихся в металлургии объектов в общем виде (табл. 6.1)

Таблица 6.1

**Общий вид передаточных функций
технологических объектов управления**

Объект	Передаточная функция
Статический	$W_0(p) = \frac{K_0}{T p + 1} \cdot e^{-\tau_0 p}$
Астатический	$W_0(p) = \frac{1}{T p} \cdot e^{-\tau_0 p}$

По виду передаточной функции объекта можно выявить второй (в дополнение к уже упоминавшемуся) признак *астатизма*: отсутствие свободного члена +1 в знаменателе передаточной функции.

Систематизируем теперь сведения о передаточных функциях стандартных линейных регуляторов (табл.6.2)

Передаточные функции автоматических регуляторов

Реализуемый алгоритм	Формы записи передаточных функций $W_p(p)$	
	1	2
Пропорциональный (П)	K_p	–
Интегральный (И)	$\frac{1}{\bar{T}_i p}$	$\frac{\bar{K}_p}{p}$
Пропорционально – интегральный (ПИ)	$K_p + \frac{1}{\bar{T}_i p}$	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_y p}\right)$
Пропорционально – дифференциальный (ПД)	$K_p + T_{\Pi} p$	$K_p (1 + T_{\Pi} p)$
Пропорционально – интегрально – дифференциальный (ПИД)	$K_p + \frac{1}{\bar{T}_i p} + \bar{T}_D p$	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_y p} + T_{\Pi} p\right)$

Передаточные функции ПИ -, ПД – и ПИД –регуляторов определяются как результат параллельного соединения соответствующих П –, И – и Д – звеньев. При этом величина используются параметры настройки регуляторов

\bar{K}_p – условный передаточный коэффициент регулятора,

\bar{T}_i – условная постоянная времени интегрирования,

\bar{T}_D – условная постоянная времени дифференцирования.

Поскольку регулятор всегда является звеном *отрицательной* обратной связи по отношению к объекту, определяем передаточные функции САР:

- по каналу возмущения приведенного по входу объекта

$$W_{\text{САР}}(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p) \cdot W_p(p)}; \quad (6.10)$$

- по каналу изменения задания

$$W_{\text{САР}}(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p) \cdot W_p(p)}; \quad (6.11)$$

где $W_0(p)$ - передаточная функция объекта;
 $W_p(p)$ - передаточная функция регулятора.

7. Устойчивость замкнутых систем

В замкнутой системе (рис.7.1,а) регулятор воздействует на объект, а объект – на регулятор. Поэтому вероятно возникновение колебательных переходных процессов (рис 7.2) в таких системах.

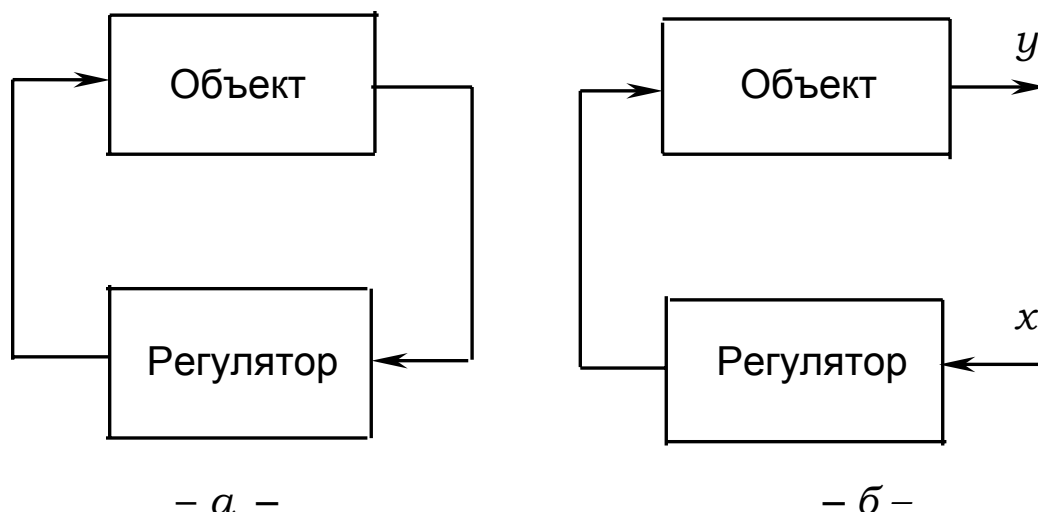


Рис.7.1. Схема САР в рабочем (а) и искусственно разомкнутом для исследования (б) состояниях.

Устойчивостью называют способность системы после дова- тельно уменьшать возникающие в ней отклонения выхода объекта от его заданного значения. Пример переходного процесса в устой- чивой САР показан на рис.7.2,а, а в неустойчивой – на рис. 7.2,б.

Наиболее часто причиной потери устойчивости физически ис- правной САР является неправильная настройка регулятора.

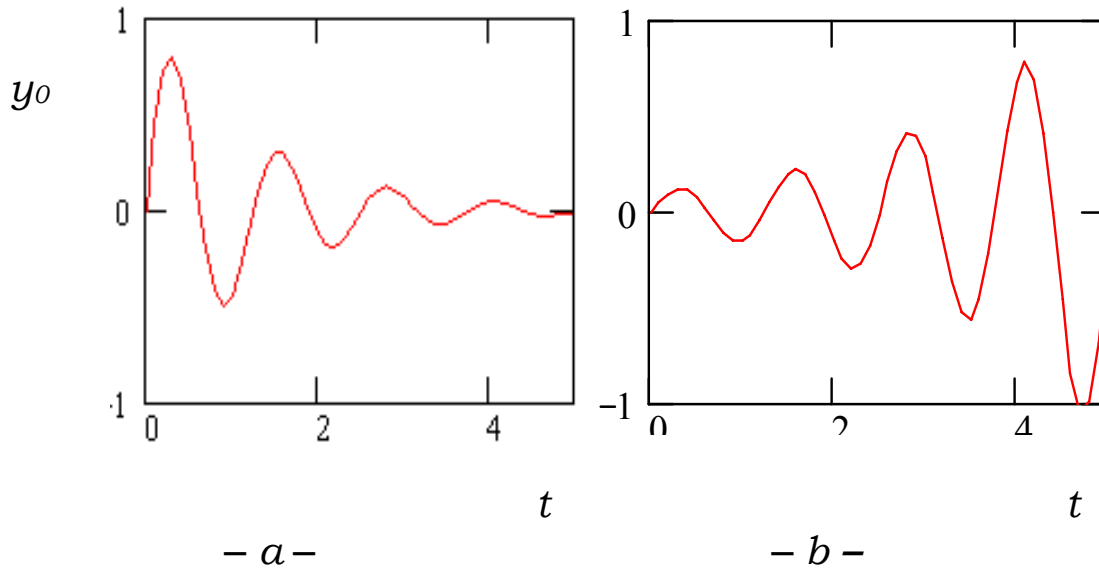


Рис.7.2. Колебательные переходные процессы в замкнутых системах: устойчивой (а) и неустойчивой (б).

Известны следующие способы *анализа* систем на устойчивость:

- 1) Непосредственное решение уравнений динамики систем и построение графика переходного процесса. Этот путь сложен, особенно при наличии чистого запаздывания.
- 2) Применение специальных критериев устойчивости, позволяющих обойти трудности математического характера.
- 3) Компьютерное моделирование переходных процессов при заданных значениях параметров объектов и регуляторов (в том числе, с использованием упомянутой авторской программы №2).

Разработан ряд критериев устойчивости, из которых *универсальным*, пригодным для любых систем, включая системы с чистым запаздыванием, является критерий Найквиста – Михайлова. Для этого критерия характерен *частотный* подход к проблеме устойчивости замкнутых систем. При этом непосредственному исследованию подвергается *разомкнутая*, хотя бы мысленно, система, а по полученным результатам судят о поведении той же системы в *замкнутом состоянии*.

Пусть рассматривается разомкнутая система (рис.7.1,а), на вход которой поданы синусоидальные колебания

$$x = x_a \cdot \sin \omega t, \quad (7.1)$$

где $x_a = \text{const}$ – амплитуда колебаний входа,
 ω - угловая частота,
 t - время.

С течением времени на выходе системы установятся также синусоидальные колебания той же частоты ω , но другой амплитуды y_a и сдвинутые по фазе относительно входных колебаний на угол φ

$$y = y_a \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (7.2)$$

Вводят понятия *частотных функций*:

$$A(\omega) = \frac{y_a}{x_a} - \text{амплитудная характеристика};$$

$\varphi(\omega)$ - фазовая характеристика.

При более общем рассмотрении рассматривают *гармонические колебания на комплексной плоскости*

$$x = x_a(\cos \omega t + i \sin \omega t); \quad (7.3)$$

$$y = y_a [\cos \omega t + i \sin(\omega t + \varphi)] = y_a e^{i(\omega t + \varphi)}, \quad (7.4)$$

где $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Использование аппарата комплексных чисел в их тригонометрической форме дает возможность две характеристики $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ объединить в одну, называемую *амплитудно – фазовой характеристикой (АФХ)*

$$W(i\omega) = \frac{y}{x} = \frac{y_a \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{i\varphi}}{x_a \cdot e^{i\omega t}} = A(\omega) \cdot e^{i\varphi(\omega)}. \quad (7.5)$$

Формально АФХ совпадает с передаточной функцией при чисто мнимом дифференциальном операторе $p = i \omega$

$$W(i\omega) = W(p). \quad (7.6)$$

Это дает возможность определить конкретные выражения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для систем с рассматриваемыми объектами и регуляторами

$$W(i\omega) = W_0(i\omega) \cdot W_p(i\omega) , \quad (7.7)$$

где $W_0(i\omega)$ и $W_p(i\omega)$ - амплитудно - фазовые характеристики объекта и регулятора.

Если объект обладает звеном чистого запаздывания, то АФХ последнего определяется выражением

$$W_s(i\omega) = e^{-i\omega\tau_0} . \quad (7.8)$$

Тогда АФХ разомкнутой системы

$$W(i\omega) = W_0(i\omega) \cdot W_p(i\omega) \cdot e^{-i\omega\tau_0} , \quad (7.9)$$

где $W_0^*(p)$ - АФХ объекта без учета чистого запаздывания.

Пример 4. Дано: объект первого порядка с чистым запаздыванием и передаточной функцией

$$W_0(p) = \frac{K_0}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau_0 p} ,$$

на котором установлен П – регулятор, имеющий передаточную функцию

$$W_p(p) = K_p .$$

Найти: выражение АФХ соответствующей системы в разомкнутом состоянии и составляющие частотные характеристики.

Решение

По правилу последовательного соединения звеньев (рис. 6.1) и с учетом выражения (6.1) имеем при $p = i\omega$

$$W(i\omega) = \frac{K_0 K_p}{iT\omega + 1} \cdot e^{-i\omega\tau_0} . \quad (7.10)$$

Отвлечемся временно от учета чистого запаздывания и рассмотрим вначале только выражение

$$W^*(i\omega) = \frac{K_0 K_p}{iT\omega + 1} = \frac{K}{1 + iT\omega}, \quad (7.11)$$

где $K = K_0 K_p$ - общий передаточный коэффициент разомкнутой системы.

Освободимся от мнимости в знаменателе, умножив числитель и знаменатель (7.11) на выражение $1 - iT\omega$, сопряженное знаменателю. Тогда получим при $i^2 = -1$ и $\tau_0 = 0$ комплексное число

$$W^*(i\omega) = \frac{K(1 - iT\omega)}{1 + T^2\omega^2} = Re(\omega) + Im(\omega), \quad (7.12)$$

где $Re(\omega) = \frac{K}{1 + T^2\omega^2}$ - вещественная частотная характеристика;

$Im(\omega) = -\frac{KT\omega}{1 + T^2\omega^2}$ - мнимая частотная характеристика.

Модуль рассматриваемого комплексного числа является *амплитудной частотной характеристикой*

$$A^*(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}, \quad (7.13)$$

а

$$\varphi^*(\omega) = \arctg \frac{Im^*(\omega)}{Re^*(\omega)} = \arctg(-T\omega) \quad (7.14)$$

– *фазовой частотной характеристикой*.

При данных значениях K , T и ω_i АФХ изобразится на плоскости комплексного переменного точкой M , так, как показано на рис. 7.3.

Введём теперь *чистое запаздывание*. Как это следует из ранее рассмотренного материала (установившееся значение выхода такого звена равно значению входа), и по физическому смыслу его амплитудная характеристика $A(\omega) = 1$, так как передаточный коэффициент $K_3 = 1$. Однако имеется фазовый сдвиг $\Delta = -\tau_0 \omega$, изо-

браженный на том же рисунке. В результате точка M смещается по дуге окружности того же радиуса $A(\omega_i)$ в положение точки N .

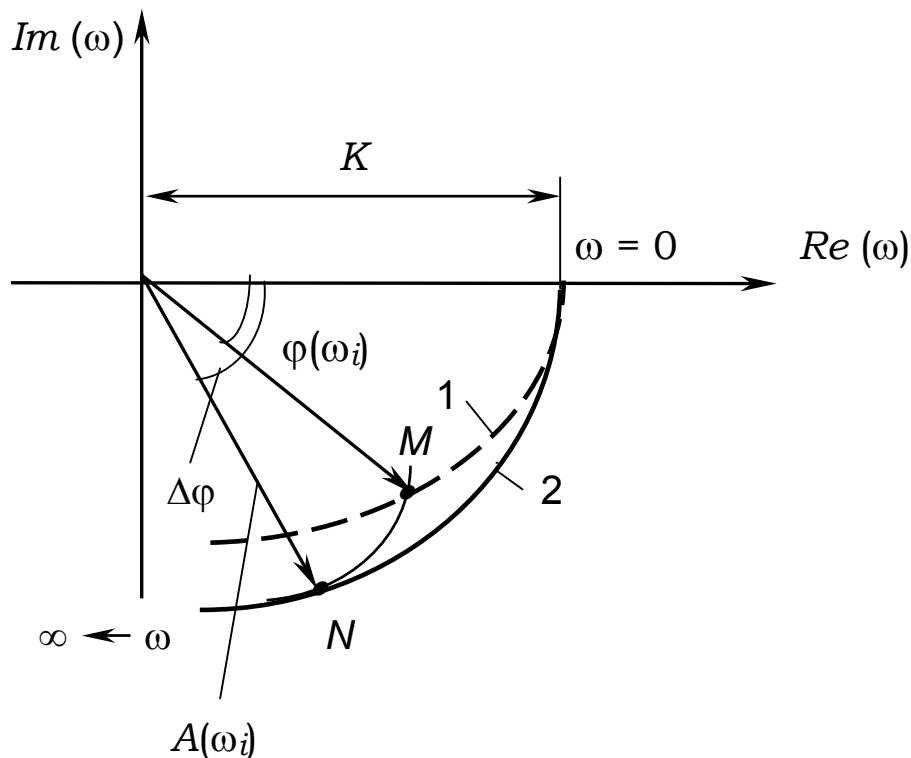


Рис.7.3. Схема годографа АФХ и его коррекция при наличии чистого запаздывания

С изменением частоты в пределах $0 \leq \omega \leq \infty$ функция $W(\omega_i)$ на комплексной плоскости описывает кривую, называемую *годографом АФХ*.

В результате действия чистого запаздывания годограф из начального положения 1 перемещается в положение 2 (рис.7.3).

Формулировка критерия Найквиста – Михайлова:

Если с ростом частоты ω от нуля до бесконечности годограф АФХ разомкнутой системы не охватывает точку, лежащую на отрицательной вещественной полуоси с координатой $-1; i \cdot 0$ (“опасную” точку), то та же система в замкнутом состоянии устойчива.

При охвате названной “опасной” точки годографом АФХ система после замыкания неустойчива.

В случае прохождения годографа АФХ через “опасную” точку система оказывается на грани устойчивости, то есть – при незатухающих колебаниях выхода объекта.

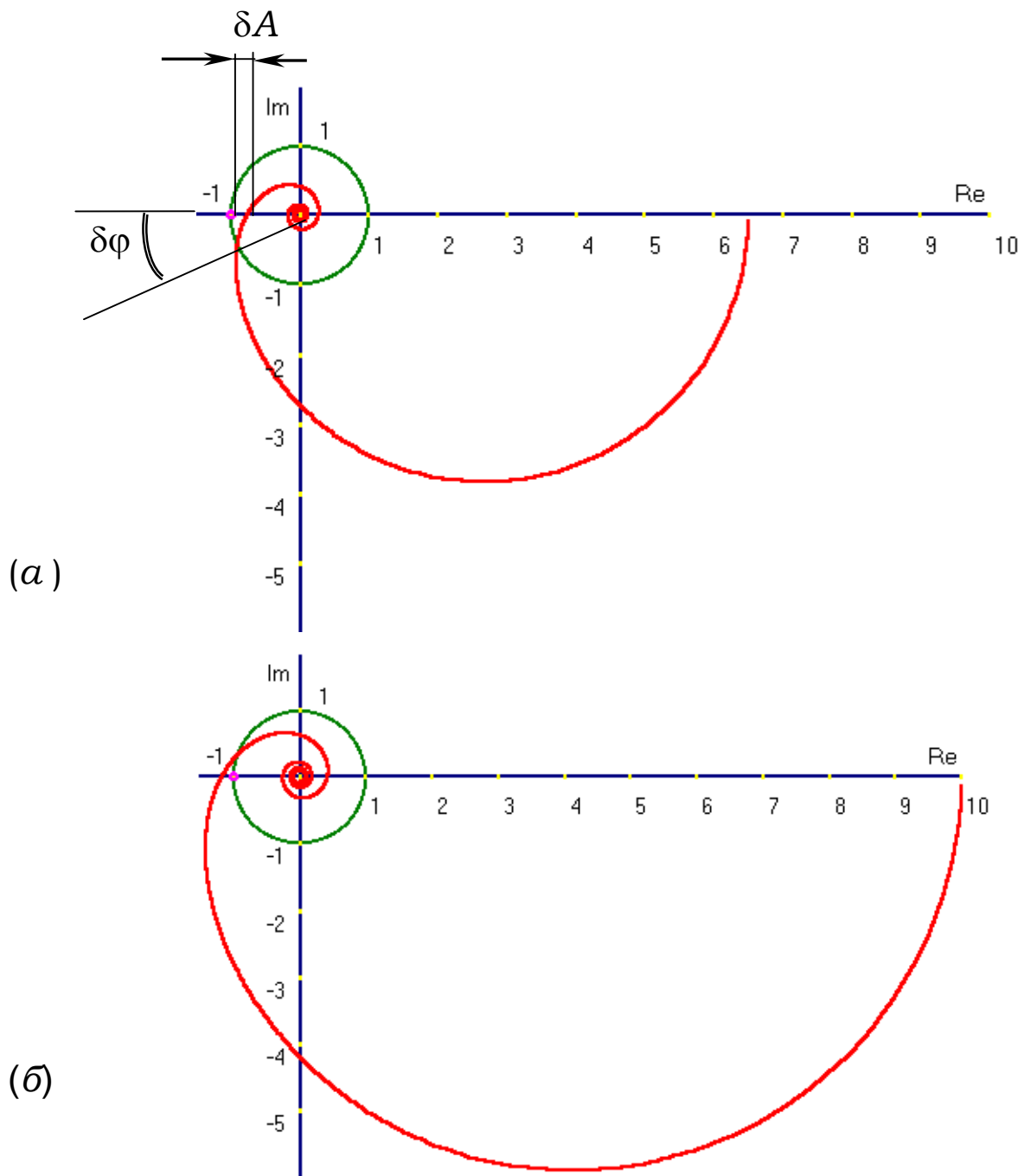


Рис.7.4. Результаты исследования устойчивости САР (а – система устойчива, б – система неустойчива)

Сказанное иллюстрируется работой компьютерной программы А1. На рис.7.4, а представлен случай, соответствующий устойчивому состоянию замкнутой САР (годограф АФХ той же системы в разомкнутом состоянии, стремясь к началу координат при $\omega \rightarrow \infty$, не охватывает «опасную» точку). Рис.7.4,б отвечает потере устойчивости той же САР. В состав исследуемой системы в качестве примера включены статический объект 1 - го порядка с пара метра-

ми: $K_0 = 1$; $T = 25$; $\tau_0 = 5$ и П – регулятор. Передаточный коэффициент последнего K_p в случае (а) установлен равным 6,5 (САР устойчива), а в случае (б) этот же коэффициент равен 10 (САР теряет устойчивость).

При устойчивом состоянии системы программа А1 сообщает также запасы устойчивости. В рассмотренном примере запас устойчивости по амплитуде составил $\delta A = 0,236$, а запас устойчивости по фазе $\delta\varphi = 25^\circ$.

8. Показатели качества регулирования

Качество регулирования оценивается некоторыми параметрами, характеризующими форму кривой переходного процесса в САР (рис 8.1). Такими показателями являются:

- Время регулирования t_p от начала переходного процесса до входа в зону $\pm\Delta$ от установившегося значения выхода объекта. Практически полагают $\Delta = 5\%$.

- Перерегулирование, которое вычисляют по формуле, %

$$\eta = \frac{x_{p1}}{x_{p2}} \cdot 100, \quad (8.1)$$

где x_{p1} и x_{p2} - амплитуды динамического отклонения выхода объекта в переходном процессе, причем x_{p1} представляет собой максимальное отклонение (в первой полувогне колебаний).

- Интегральный квадратичный критерий

$$I = \int_0^{\infty} x^2 dt. \quad (8.2)$$

Представленные показатели качества регулирования определяются как свойствами объекта, так и установленными на регуляторе параметрами настройки.

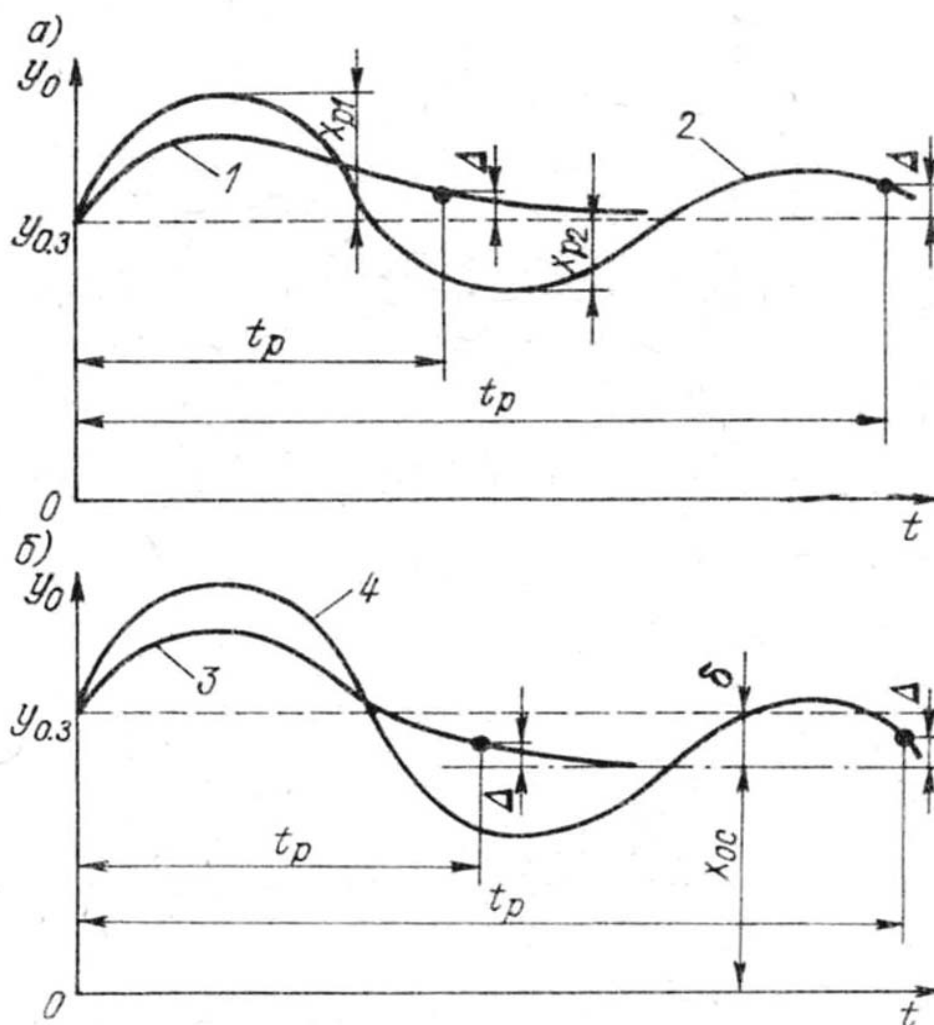


Рис.8.1. К определению показателей качества регулирования (а – процессы без статической ошибки, б – процессы со статической ошибкой; 1, 3 – аperiodические, 2, 4 – колебательные затухающие)

Выбор настроек осуществляют исходя из технологических соображений. Так, если колебания выхода объекта вообще недопустимы, то настраивают регулятор на аperiodический переходной процесс.

Настройки для $\eta = 20\%$ используют в случае необходимости минимизации длительности первой полуволны колебаний, когда отклонение выхода объекта от заданного значения особенно велико. Часто параметры настройки регулятора устанавливают для достижения минимума интегрального квадратичного критерия качества регулирования (8.2). В последнем случае начальные колебания, амплитуда которых велика, гасятся быстро, а последующие, прак-

тически не влияющие на технологию производства, допускаются на более значительное время.

Следует иметь в виду, что при использовании П – и ПД – регуляторов имеет место статистическая ошибка $\Delta = x_{\text{СТ}}$, показанная на рис.8.1, б. С целью её сокращения следует увеличивать передаточный коэффициент регулятора K_p в пределах, допустимых для обеспечения устойчивости системы и сохранения желаемых показателей качества регулирования.

Удобным средством поиска оптимальных значений настроечных параметров регуляторов может служить упомянутая компьютерная программа АЗ.

9. Оптимизирующее регулирование

Особую разновидность САР в металлургическом производстве представляют собой системы *экстремального регулирования* (автоматической оптимизации). В отличие от рассмотренных выше регуляторов, используемых в замкнутых по отклонению системах, экстремальные регуляторы (оптимизаторы) осуществляют поиск неизвестного заранее и, следовательно, не устанавливаемого на задатчике, экстремального значения выхода объекта – либо максимума, либо минимума, в зависимости от характера решаемой задачи.

Экстремальные регуляторы применяют на объектах, обладающих *экстремальными статическими характеристиками*. Типичным примером подобного объекта является *вагранка*, у которой выходом служит температура чугуна на выпуске

$$\theta = f(Q_T; Q_B), \quad (9.1)$$

где Q_T – расход топлива, кг/ч; Q_B – расход воздуха, м³/ч.

Оптимальный расход воздуха $(Q_B)_{\text{опт}}$ при данном расходе топлива обеспечивает $\theta \rightarrow \max$. Экстремальный регулятор воздействует на объект *методом проб и ошибок*. Процесс поиска оптимального расхода воздуха (или — выхода объекта вообще) может осуществляться как в шаговом режиме (кривая А на рис. 9.1), так и при непрерывном изменении входа объекта (кривая Б). Реверсирование последнего осуществляется по обнаружению «ошибки», т. е. ухода от искомого максимума выхода объекта на величину Δ , которую называют *зоной нечувствительности*. Достижение значения Δ в большинстве конструкций таких регуляторов, предназначенных

для работы на инерционных металлургических и литейных объектах, определяется сравнением текущего y_0 с запомненным максимумом $(y_0)_{\max}$

$$\Delta = (y_0)_{\max} - y_0. \quad (9.2)$$

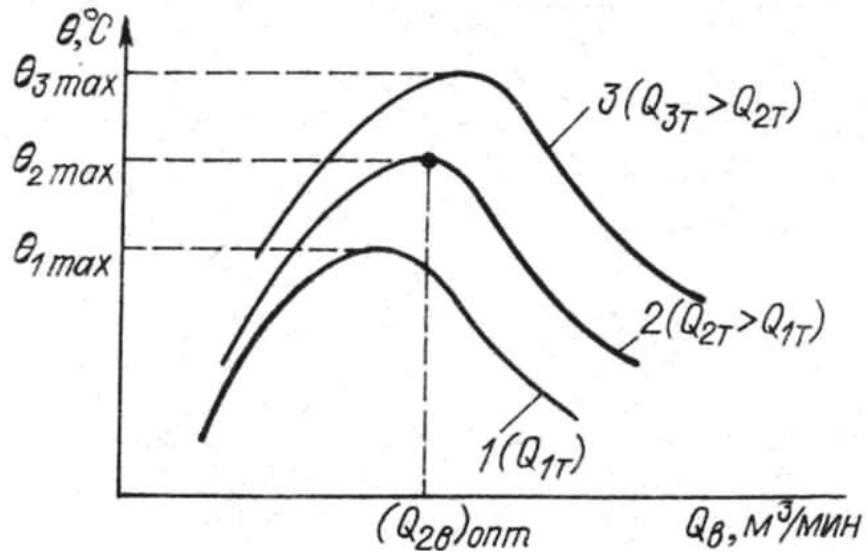


Рис.9.1. Статические характеристики вагранки как объекта экстремального регулирования

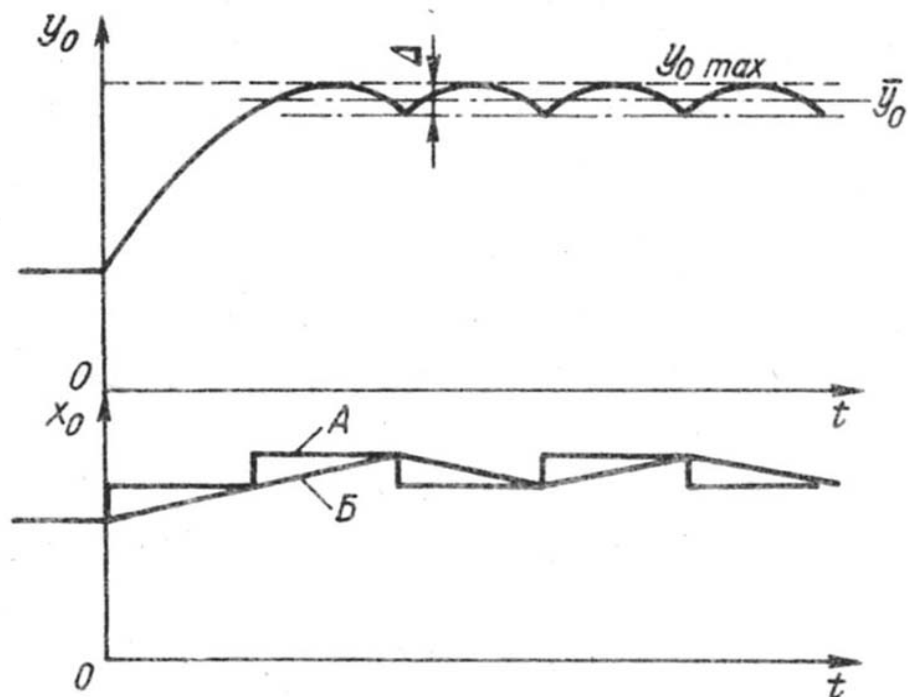


Рис.9.2. Процесс поиска экстремума выхода объекта автоматическим оптимизатором

Как следует из рис. 9.2, выход объекта при рассматриваемом способе регулирования поддерживается в автоколебательном режиме, при котором среднее значение выхода $\bar{y}_0 < (y_0)_{\max}$, то есть имеет место некоторая «потеря на поиск». Минимизация этой потери осуществляется оптимальной настройкой экстремального регулятора, например, по методике [42].

Достигнутое, близкое к максимально возможному, значение выхода объекта при данном Q_T (см. рис. 9.1) может отличаться от заданного согласно технологии ведения процесса. Для того чтобы устранить рассогласование, объект оснащают двухконтурной системой авторегулирования [42], в которой один замкнутый контур предназначен для поиска оптимального значения одного из входов объекта (Q_B), а другой — служит для поддержания выхода объекта вблизи его заданного значения путем воздействия на второй вход (Q_T).

Успешная работа экстремального регулятора требует тщательной фильтрации сигнала помех на его входе. Такой сигнал обусловлен случайным воздействием на объект различных технологических возмущений. Для выделения полезного сигнала выхода объекта на фоне действия помех на входе экстремальных регуляторов устанавливают соответствующие фильтры.

В этих условиях, учитывая сложность устройства экстремального регулятора, функции его, в том числе и фильтрации полезного сигнала, могут успешно выполнять компьютер или микропроцессорные системы, используемые по специальной программе в АСУ ТП. Это в равной степени распространяется и на другие регуляторы, как нелинейные, так и линейные, роль которых могут выполнять средства вычислительной техники, действующие по соответствующим алгоритмам регулирования.

Для цели компьютерного моделирования процесса оптимизирующего моделирования автором разработана специальная программа А4.

10. Элементы техники автоматизации производственных процессов

В соответствии с потребностями техники и технологии производства отечественные и зарубежные фирмы серийно выпускают устройства для комплектации систем автоматизации:

- средства измерения технологических параметров, подвергающихся контролю и регулированию;

- автоматические регуляторы;
- задатчики (задающие устройства стабилизации или программного регулирования);
- исполнительные механизмы;
- регулирующие органы;
- автоматические оптимизаторы и т. п.

Локальные САР оборудуются индивидуальным комплектом таких устройств для регулирования каждой из технологических величин (выхода соответствующего объекта). При этом регулятор в виде функционально законченного блока включает в себя элемент сравнения, усилитель сигнала рассогласования и элементы дополнительной обратной связи для необходимого алгоритма регулирования [1].

В то же время, наметилась тенденция к применению централизованных средств автоматического контроля и регулирования производственных параметров. К числу таких средств относятся многоканальные микропроцессорные управляющие устройства. Известна серия таких устройств под названием РЕМИКОНТ (от слов “регулирующий микропроцессорный контроллер”), а также их зарубежные аналоги, например изделия фирмы Siemens.

В этих устройствах использованы малоразрядные цифровые блоки, построенные на больших или сверхбольших интегральных микросхемах, образующих микропроцессор, и блоки постоянной и оперативной памяти. Эти устройства в принципе выполняют те же функции, что и центральный процессор компьютера, но в уменьшенном объеме и с меньшей скоростью. Они обладают программируемой логикой и на основе задаваемой программы способны осуществлять достаточно сложные функции управления некоторым множеством объектов путем циклического их обегания при работе специального коммутатора. Так, РЕМИКОНТ имеет возможность выполнять независимое автоматическое регулирование по любым линейным алгоритмам на объектах числом до 64 и на таком же числе объектов производить позиционное регулирование. Кроме того, имеется возможность производить дискретные переключения на 126 внешних цепях согласно принятой логике управления. Время цикла обегания может устанавливаться равным 0,27; 0,51; 1,02; 2,04 с. В соответствии с выбранной и загруженной в оперативную память программой микропроцессор перерабатывает информацию, поступающую от датчиков, и преобразует ее в управляющие воздействия на технологические и иные объекты.

Основное направление развития микропроцессорных систем – мультипроцессорность, выражающаяся в возможности практически

одновременной работы по многим каналам связи. При этом предусматривается автоконтроль за состоянием системы, сигнализация об отказе тех или иных блоков и возможность их авторезервирования, то есть ввода в действие резервных блоков взамен блоков, вышедших из строя.

Во многих приложениях микропроцессорное управление способно вытеснить релейные электрические системы, обеспечивая тем самым переход на программируемую и перепрограммируемую бесконтактную аппаратуру автоматического управления со свойственной ей эксплуатационной гибкостью и высокой надежностью.

Если функции управления сводятся только к переключению электроприводов, например, машин-автоматов литейного производства (стержневых, формовочных и др.), т.е. машин, циклически повторяющих движения своих элементов, то здесь все более широкое применение находят программируемые *логические* микропроцессорные контроллеры (ЛОМИКОНТЫ). Один такой контроллер выполняет функции комплекта релейной аппаратуры – электромагнитных реле и контакторов, обычно занимающих целый крупногабаритный шкаф.

11. Промышленные манипуляторы и роботы

Автоматизация производственных операций, связанных со сложными пространственными перемещениями объектов – порций металлошихты в бадью для последующей загрузки в плавильную печь, элементов литейной формы в процессе ее сборки, заливочного ковша для подачи расплава в машину литья под давлением и пр. – базируется на использовании специальных устройств, называемых манипуляторами и роботами.

Манипулятор является многозвенным механизмом с числом степеней подвижности (степеней свободы движений звеньев кинематической цепи относительно звена, принятого за неподвижное) от трех до девяти. Управление манипулятором может производиться как вручную, так и автоматически – по заданной программе движений, определяемой конструкцией манипулятора. Автоматический манипулятор называют также *автооператором*.

Выходным звеном манипулятора служит захватное устройство (рабочий орган) для схватывания и удержания переносимого объекта, включая и сменный технологический инструмент.

Каждая степень подвижности оснащается электрическим, гидравлическим, пневматическим или комбинированным приводом.

Пневмопривод, как правило, обеспечивает наиболее высокое быстродействие манипулятора.

Промышленный робот принципиально отличается от манипулятора возможностью гибкого изменения программы движений в соответствии с технологическими потребностями производства. Промышленный робот определен как автоматическая машина, представляющая собой совокупность манипулятора и перепрограммируемого устройства управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные функции человека при перемещении предметов производства и оснастки.

Перепрограммирование робота может производиться при помощи обслуживающего персонала или автоматически.

Роботы первого поколения известны под названием “механическая рука”. Они явились по существу переходной ступенью между манипуляторами и собственно роботами.

Роботы второго поколения получили наименование “глаз – рука”, причем функции технического зрения выполняют фотоэлементы или телевизионные камеры.

Современные роботы третьего поколения характеризуются как “глаз – мозг – рука”, в составе которых роль технического мозга возложена на микропроцессорную систему или компьютер, управляющие роботом.

В состав промышленного робота (рис. 11.1) могут входить путьпровод 1, основание 2, корпус 3, рука 4, захватное устройство 5. На этом же рисунке показана система координат xuz основных движений: поступательного движения корпуса робота uz и его руки xx , zz , а также вращательного движения корпуса φ_{xy} и руки φ_{yz} , φ_{xz} . Символом δ обозначено направление движения захвата.

Системы управления промышленными роботами в зависимости от способа задания движения рабочего органа подразделяются на позиционные и контурные. В позиционных системах программой управления предусматривается задание координат отдельных точек траектории перемещения объекта, а в контурных – для повышения точности – вся траектория.

Промышленные роботы второго и третьего поколений обладают способностью к обучению. В процессе обучения в памяти микропроцессорной системы или компьютера запоминаются операции, выполняемые при ручном управлении роботом, которые затем могут воспроизводиться в автоматическом режиме неограниченное число раз.

Несмотря на то, что современные промышленные роботы значительно уступают человеку по числу степеней подвижности (у руки

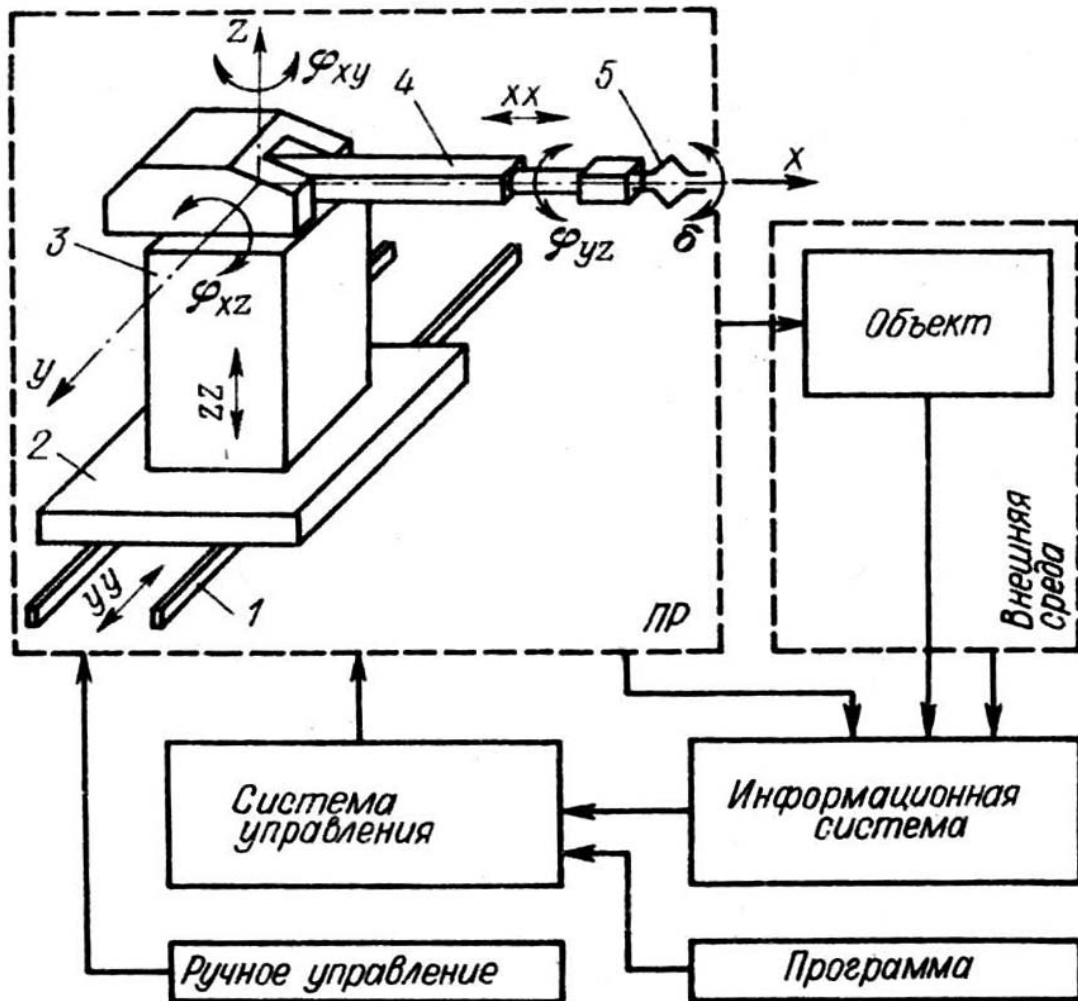


Рис.11.1. Пример структурной схемы промышленного робота

человека их 27), роботы могут заменить человека при выполнении широкого спектра работ. Роботизация обеспечивает значительную экономию людских и материальных ресурсов, повышает производительность труда и сменность работы оборудования. Объединение прогрессивных форм оборудования, систем автоматизации и робото-технологических линий ведет к созданию *гибких автоматизированных производств* (ГАП).

К настоящему времени для автоматизации отдельных литейных процессов могут быть использованы универсальные роботы общепромышленного назначения с числом степеней подвижности не менее 6, способные переместить объект по любой траектории с любой

его переориентацией в пространстве, и роботы, которые разработаны с учетом конкретной специфики литейного производства.

Освоена роботизация таких процессов, как литье под давлением (с объемным дозированием заливаемого металла, съемом отливок и подачей их в пресс для обрубки литников), литье в кокиль, литье по выплавляемым моделям, дробеструйная очистка отливок, вспомогательные работы, транспортные операции. Кроме того, возможно и в ряде случаев практически осуществлено применение достаточно совершенных роботов для автоматизации операций окраски форм и стержней, установки стержней в формы, извлечения отливок из сырых песчано-глинистых форм, снятия горячих отливок с конвейера и манипулирования ими в процессе рентгеновской или гамма-дефектоскопии, сортировки и разбраковки отливок, осторожной (без боя) укладки отливок в тару и др.

Фирма SCRATA (Великобритания) разработала и выпускает роботизированную установку для огневой отрезки прибылей от стальных отливок, некоторые ее модификации служат для абразивной зачистки отливок в условиях интенсивного тепло-, газо- и пылевыделения.

Консольный манипулятор модели "Scobotman-500" (Швеция) при температуре 700...800⁰С снимает отливки блоков цилиндров массой до 200 кг с выбивной виброрешетки и подвешивает на крюки охлаждающего конвейера. Один из промышленных роботов той же фирмы снимает отливки массой 2,6 кг с 42-местной тележки и последовательно подает их на позиции отрезки литников абразивным кругом, удаляет остатки формовочной смеси из "карманов" пневмозубилом, зачищает остатки питателей абразивной лентой.

Становится технически возможным включение промышленных роботов и автооператоров в автоматические линии литейного производства.

12. Автоматизированные системы управления

В отличие от систем автоматического управления (САУ) системы автоматизированного управления (АСУ) представляют собой человеко-машинные системы, где на долю человека – оператора различных рангов приходится творческая часть решения задачи управления – принятие оптимальных решений в изменяющейся производственной ситуации, а компьютер используется в качестве помощника человека, предоставляя в распоряжение последнего свою огромную память и очень высокое быстродействие.

АСУ способны решать значительно более сложные задачи, чем САУ.

Автоматизированные системы управления служат мощным средством научно – технического процесса во всех сферах промышленного производства, в частности в такой его сложной и трудоемкой отрасли, как литейное производство.

Применение АСУ обеспечивает дальнейший рост технико-экономической эффективности процессов производства отливок.

Различают две типичные разновидности автоматизированных систем управления:

- автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП);
- автоматизированные системы управления предприятием (АСУП).

12.1. Автоматизированные системы управления технологическими процессами литейного производства

В общей структуре АСУ ТП (рис. 12.1) объектом служит как отдельный производственный агрегат, так и некоторый взаимосвязанный их комплекс (поточная линия, участок цеха или цех). На выходах объекта располагаются датчики $D_1 \dots D_n$ измерения технологических параметров как источники оперативной информации о состоянии объекта. Входы объекта оборудуются исполнительными механизмами ИМ1...ИМ k для ввода управляющих воздействий.

В простых случаях программируемый микропроцессорный контроллер или более совершенное управляющее звено в виде компьютера (а также – управляющего вычислительного комплекса УВК) работает как обычный многоканальный регулятор. Однако с целью повышения надежности системы в процессе ее эксплуатации возможен вариант, когда управляющие воздействия на объект вводятся не непосредственно, а на задатчики локальных стабилизирующих регуляторов.

Изображенный на рис. 12.1 *коммутатор* служит для переключения входных (информационных) и выходных (управляющих) каналов связи, а специальное устройство сопряжения с объектом (УСО) предназначено для преобразования информационных и управляющих сигналов.

Для компьютера как цифрового вычислительного устройства входные и выходные сигналы имеют вид цифровых кодов. В то же время от датчиков поступают сигналы в аналоговой форме, то есть

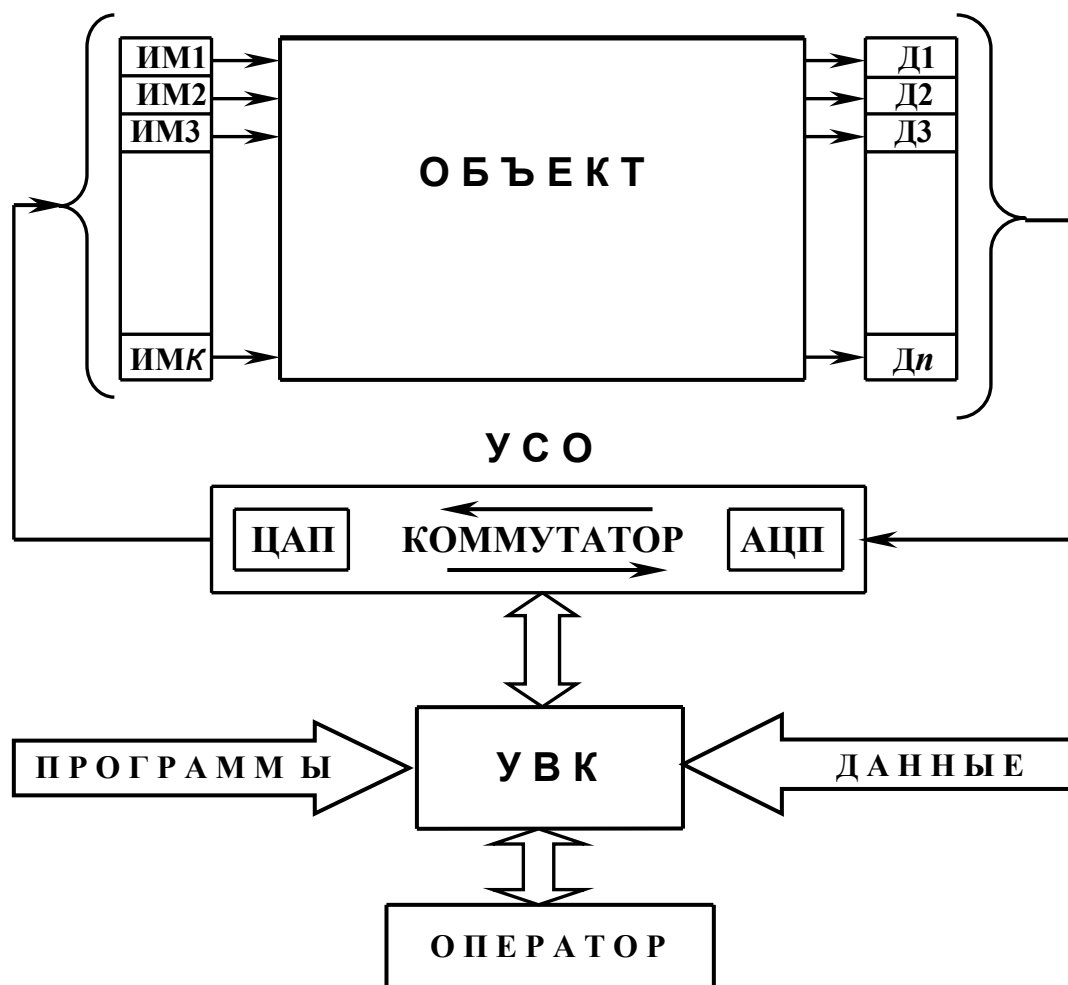


Рис.12.1. Пример структурной схемы АСУ ТП

в виде непрерывно изменяющихся токов или напряжений. Для преобразования таких сигналов в цифровую форму служат *аналого-цифровые преобразователи* (АЦП), а преобразование цифровой информации с выхода компьютера в аналоговые силовые воздействия (достаточно мощные токи и напряжения для привода исполнительных механизмов) существуют *цифро-аналоговые преобразователи* (ЦАП) [1], с. 115...118.

Обзор локальных САУ и АСУ ТП на различных стадиях литейного производства приведен в работе [1], где подробно описаны системы автоматизации шихтовки, плавки в вагранках, дуговых и индукционных печах, смесеприготовления, формообразования, заливки расплавов в формы и др.

Помимо чисто управляющих функций компьютер в составе АСУ ТП в период между выдачей управляющих воздействий на объект может выполнять ряд расчетов, например - определения оптимального состава плавильных шихт, оптимального освежения оборотных литейных материалов, оптимальных значений технологических

параметров на основании статистического анализа производственных данных и пр. Результаты этих расчетов оперативно используются в процессе управления.

Особыми расчетами является реализация специальных методов оптимального управления, чему посвящен следующий раздел. Здесь же отметим, что при значительной расчётной нагрузке управляющей системы с целью борьбы с её усложнением применяют приём её *декомпозиции*. Одним из ее решений служит переход от одноуровневой к многоуровневой (иерархической) структуре АСУ ТП, при которой на нижнем уровне осуществляется непосредственное управление объектами, а верхний уровень на базе отдельных компьютеров, связанных с нижним уровнем, загружается задачами, обеспечивающими наиболее благоприятные условия функционирования АСУ ТП в целом.

Устройства цифровой вычислительной техники, действующие в составе АСУ ТП, используются также для фиксации всей оперативной информации и её наглядного отображения в документах, экранных окнах, табло. Эти же устройства приводят в действие предупредительную и аварийную сигнализацию.

В отличие от чисто *технической направленности* рассмотренных АСУ ТП автоматизированные системы управления *предприятием* АСУП предназначены для управления работой *коллективов людей*, обеспечивающих производство, в том числе и нижестоящий уровень управления в виде АСУ ТП.

АСУ управления таким сложным предприятием, как литейное, строится по иерархической схеме (рис. 12.2). Эта схема выработана практикой и является результатом декомпозиции (разложения) сложной задачи управления на систему подзадач по определенным уровням иерархии.

На высшем уровне 1 осуществляется планирование работы предприятия в соответствии с директивами вышестоящих организаций и с учетом научно-технического прогресса, развития предприятия и его подразделений, тенденций к изменению спроса на продукцию.

На уровне 2 согласно содержанию портфеля заказов производится оформление заказов, организация снабжения сырыми материалами и сбыта готовой продукции, учет простоев оборудования и технико-экономических показателей, планирование текущих ремонтов, составление оптимальных графиков грузопотоков и загрузки оборудования, выбор рациональной технологии и оптимальных режимных параметров оборудования.

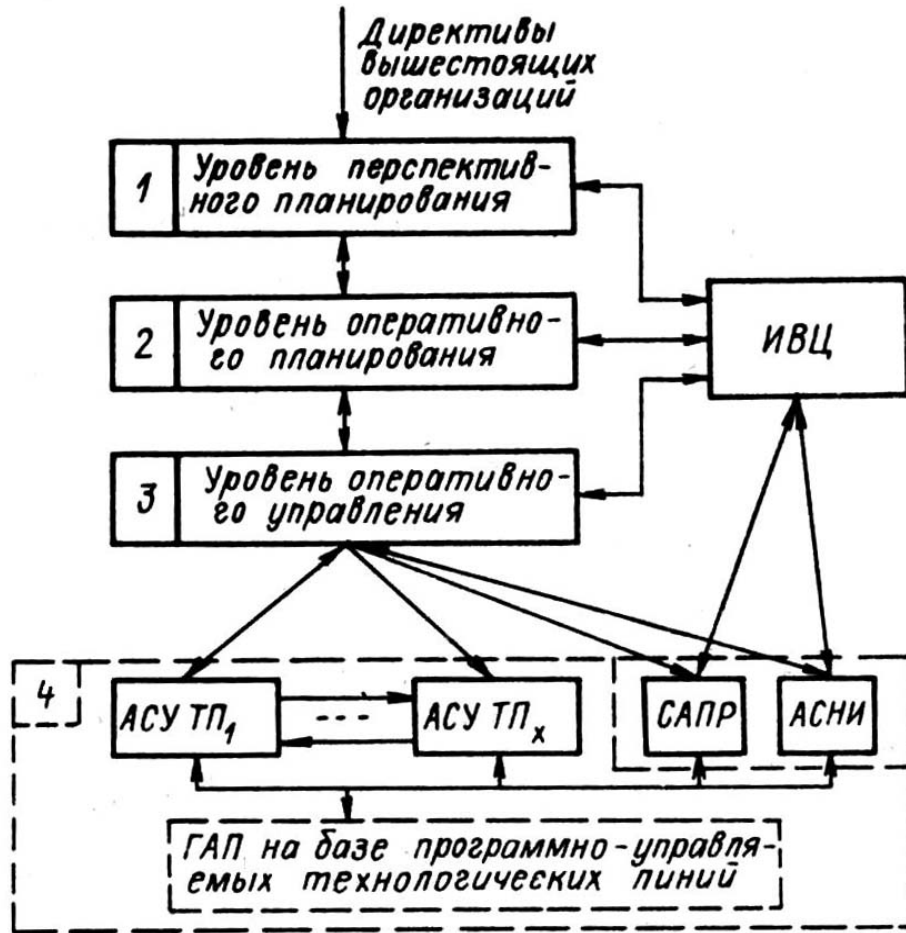


Рис.12.2. Иерархическая структура АСУП литейного предприятия

На уровне 3 в соответствии с материалами вышестоящего уровня решаются задачи координации действий отдельных подразделений предприятия и готовится база для оптимального управления путем моделирования ситуаций и обработки массивов специальной информации.

Низшим уровнем 4 в иерархической структуре АСУП является уровень АСУ ТП, к которому примыкают системы автоматизированного проектирования САПР литейной технологии и автоматизированные системы научных исследований АСНИ, сопряженные с теми же технологическими объектами управления (ТОУ).

АСНИ призваны систематически контролировать технологические параметры производственных процессов, осуществлять статистические исследования, прогнозировать тенденции динамики технико-экономических показателей и, в особенности, - качества продукции на основе пооперационного контроля, синтезировать математические модели и путём моделирования (вычислительного экс-

перимента) выявлять возможные режимы оптимизации технологии на различных участках литейного производства.

САПР с использованием математических моделей, стандартов и технических условий, мощных графопостроителей и других средств призваны оказывать помощь производственному персоналу в оперативной разработке технологических процессов и всей необходимой документации, включая рабочие чертежи и схемы, обеспечивая быструю переналадку автоматических линий при переходе к новым видам продукции. Типовые задачи САПР конструкторско-технологического проектирования охарактеризованы в работе [1], с. 128...133.

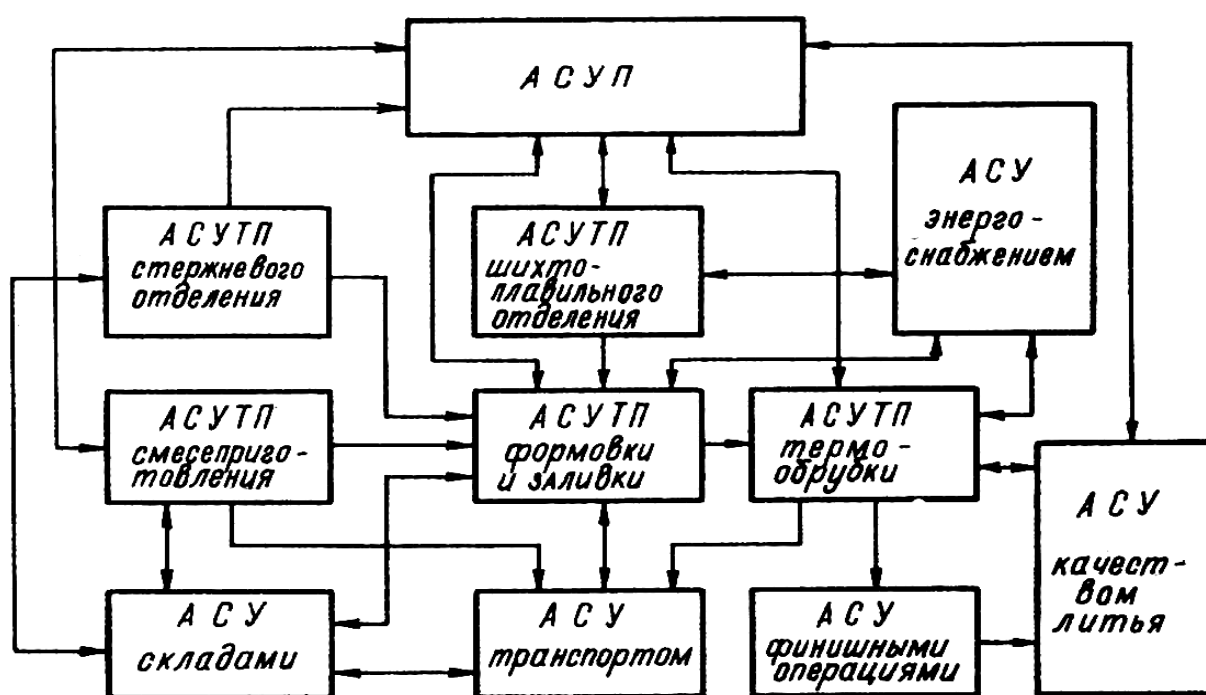


Рис.12.3. Структурная схема интегрированной АСУ литейным предприятием

Наметилась тенденция к объединению специализированных АСУ ТП отдельных производств и АСУП в форме *интегрированной АСУ* (рис. 12.3).

Подобная интеграция, кроме непосредственных функций – координирования работы составляющих АСУ, позволяет на основе информационного обмена между компьютерами резко уменьшить объёмы массивов информации, сократить время её поиска, сократить необходимость дублирования информации и снизить численность обслуживающего персонала.

Информация из цехов предприятия через локальные вычислительные сети регулярно поступает в АСУП обо всех видах работ, поступлении сырья, отгрузке полуфабрикатов или готовой продукции.

В АСУП производится также множественный учёт массивов личного состава, основных фондов, норм и фактического расходования материалов; осуществляются расчеты заработной платы, амортизационных отчислений и подготовка платёжных ведомостей.

Любой из показателей директором завода, начальниками цехов и служб может быть вызван на экран монитора, а система показателей в форме таблиц или графиков использована для анализа производственной ситуации и принятия решений по необходимой коррекции процессов управления производством в целом и на отдельных его этапах.

Эффективность работы интегрированной АСУП характеризуется рядом критериев.

Экономические критерии в обобщенной форме можно представить в виде приведенного дохода [39]:

$$D_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n C_i P_i - Z_3 - E_n K_t \rightarrow \max, \quad (12.1)$$

где C_i — отпускная цена отливок, руб.; P_i — производство отливок за период времени t , шт.; Z_3 — эксплуатационные затраты, руб.; E_n — нормативный коэффициент; K_t — капитальные затраты за тот же период времени, руб.

Росту критерия $D_{\text{пр}}$ способствуют повышение качества отливок и снижение затрат на их производство. Недостаток критерия $D_{\text{пр}}$ и других критериев чисто экономического характера заключается в неполной его конкретизации применительно к управлению техническими системами.

Поэтому в последнее время все более широко используют комбинированные — технико-экономические критерии, из которых определенными преимуществами обладают удельные затраты [96]:

$$S = S_1 / S_2, \quad (12.2)$$

где S_1 — затраты на потребляемые сырье и энергию; S_2 — мера выпуска продукции за время t .

При этом

$$S_1 = \int_0^t \sum_{i=0}^k (Q_i + E_i S_{ei} + n_i S_{ni}) dt; \quad (12.3)$$

$$S_2 = \int_0^t \sum_{i=1}^k (K_k K_c Q_{ij}) dt, \quad (12.4)$$

где Q_i — расход материалов (включая шихтовые, формовочные, стержневые, отработанную смесь и возврат литья); E_t — расход энергии (электрической, сжатого воздуха); S_{qi} , S_{ei} , S_{ni} — стоимость единиц сырья, энергии и очистных работ соответственно; n_i — число отливок, подвергающихся очистке; k — общее число отливок, произведенных за время t ; Q_{ij} — производительность цеха (участка) по отливкам вида j за то же время; K_k — коэффициент качества отливок (в идеальном случае $K_k = 1$, при снижении качества K_k уменьшается); K_c — коэффициент сложности отливки (для наиболее сложной отливки $K_c = 1$, а для отливок меньшей сложности $K_c < 1$).

Одним из важнейших ограничений здесь является условие

$$\sum_{i=1}^k Q_{ij} \geq Q_3, \quad (12.5)$$

где Q_3 — заданная производительность цеха (участка).

В соответствии с целевой функцией (12.2) и при использовании требуемого программного обеспечения компьютеров в составе АСУ ТП эта система реализует оптимальные управляющие воздействия на ТОО.

Задача оптимального управления производством отливок в целом подразделяется на ряд подзадач оптимального управления составляющими общего производственного процесса в виде технологических процессов шихтовки, плавки, смесеприготовления, формовки, заливки форм, очистки поверхности отливок и пр. на отдельных участках литейного цеха. Согласно современным тенденциям обеспечения наибольшей живучести технических систем управления специализированные АСУ ТП на отдельных участках функционируют независимо друг от друга (децентрализованная структура АСУ ТП), но их работа координируется центральным компьютером АСУ ТП литейного цеха.

В настоящее время особое значение приобретает автоматизированное управление *качеством отливок*. Для этого используются технические средства оценки показателей качества: массы и размеров отливок, глубины пригарных корочек, шероховатости поверхности, механических свойств, химического состава, внутренних дефектов и др. При обнаружении отклонений от заданных значений показателей качества на каждой стадии технологического процесса управляющий вычислительный комплекс вырабатывает необходимые управляющие воздействия на процесс производства отливок.

Внешние связи на современном уровне осуществляются через Интернет и с использованием электронной почты [2], с. 19...28.

13. Методы оптимального управления технологическими процессами

В этом разделе рассмотрим некоторые методы *динамической оптимизации*, при которой действующие в процессе величины изменяются во времени. Для реализации таких методов используются динамические модели, базирующиеся, в частности, на аппарате дифференциальных уравнений. При этом оптимальным решением считается такое, которое обеспечивает экстремальное (минимальное или максимальное, в зависимости от условий задачи) значение некоторого критерия, характеризующего *качество управления* [4].

Как правило, в данной области используются *интегральные критерии-функционалы*. Численное значение функционала непосредственно характеризует качество процесса управления рассматриваемого объекта, например:

а) критерий *максимального быстрогодействия* системы:

$$I_1 = \int_0^{\tau_y} dt = \tau_y \rightarrow \min, \quad (13.1)$$

где t – текущее время;

τ_y – время управления, под которым подразумевается интервал времени, в течение которого объект под воздействием управления переходит из известного начального состояния в заданное конечное состояние;

б) комплексный критерий оптимальности

$$I_2 = b_1 \int_0^{\infty} (y_{03} - y_0) dt + b_2 \int_0^{\infty} [U(t) - U_{\min}]^2 dt, \quad (13.2)$$

где y_{03} и y_0 – как и выше, – заданное и текущее значения выхода объекта; $U(t)$ – затраты на управление, включающие в себя стоимость средств управления, стоимость их эксплуатации и стоимость энергии, затрачиваемой на управление; U_{\min} – минимальные затраты на управление, при которых возможен технологический процесс; b_1 и b_2 – коэффициенты.

Первый интеграл в выражении (13.2) оценивает точность управления. Возведение ошибки управления $y_{03} - y_0$ в квадрат, кроме исключения знака, повышает весомость больших ошибок, особенно вредно сказывающихся на течении технологического процесса (ошибки температурного режима в плавильных и термических печах, ошибки поддержания состава формовочных и стержневых смесей и пр.).

Второй интеграл выражения (13.2) характеризует перерасход на управление, ценой которого названные выше ошибки сокращаются до приемлемого уровня.

Минимальное значение I_2 отвечает разумному компромиссу между затратами на управление и получаемыми результатами этого управления.

В соответствии с особенностями существующих методов динамической оптимизации дифференциальные уравнения математических моделей объектов требуют особого преобразования. Это преобразование заключается в эквивалентной замене дифференциального уравнения n -го порядка системой дифференциальных уравнений первого порядка.

Пусть, например, некоторый объект моделируется дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$a_2 \frac{d^2 y_0}{dt^2} + a_1 \frac{dy_0}{dt} + a_0 y_0 = b_0 x_0. \quad (13.3)$$

Примем обозначения

$$y_1 = y_0; \quad y_2 = \frac{dy_1}{dt} = y_1' = y_0'; \quad y_2' = \frac{d^2 y_1}{dt^2} = y_0''.$$

Тогда вместо (13.3) получаем систему уравнений

$$\begin{aligned}
 y_1' &= y_2; \\
 y_2' &= -\frac{a_1}{a_2} y_2 - \frac{a_0}{a_2} y_1 + \frac{b_0}{a_2} x_0.
 \end{aligned}
 \tag{13.4}$$

В практических задачах динамической оптимизации подобно задачам статической оптимизации (методам математического, в частности, - линейного программирования) также существуют *ограничения*. Последние обусловлены конечной, а не бесконечно большой пропускной способностью коммуникаций, ограниченной производительностью оборудования, ограничениями технологических параметров (например, температура в плавильных печах ограничена мощностью тепловыделения и стойкостью огнеупорной футеровки) и т.д. Поэтому классический метод решения оптимизационных задач оказывается неприемлемым, и потребовалась разработка специальных методов.

13.1. Принцип максимума

Принцип максимума, являющийся аналитическим методом решения широкого круга задач динамической оптимизации, разработан в СССР (1952г.) академиком Л.С.Понтрягиным и его школой. Для реализации метода выполняют действия в следующем порядке:

1) Математическую модель объекта представляют в виде системы дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned}
 \frac{dy_1}{dt} &= f_1(X; Y); \\
 \frac{dy_2}{dt} &= f_2(X; Y); \\
 &\dots \\
 \frac{dy_n}{dt} &= f_n(X; Y),
 \end{aligned}
 \tag{13.5}$$

где для компактности записи приняты *векторные обозначения*

$$\begin{aligned}
 X &= X(x_{01}, x_{02}, x_{03}, \dots, x_{0n}); \\
 Y &= Y(y_{01}, y_{02}, y_{03}, \dots, y_{0n}).
 \end{aligned}$$

2) Составляют интегральный критерий оптимальности (функционал):

$$I = \int_0^{\tau_y} f_0(X; Y) dt \rightarrow \min. \quad (13.6)$$

Если целью управления является максимальное быстродействие системы (13.1), то

$$f_0(X; Y) = 1.$$

3) Задаются ограничениями на векторы входа и выхода объекта:

$$\alpha \leq X \leq \beta ; \quad \gamma \leq Y \leq \delta. \quad (13.7)$$

4) Для поиска оптимального решения вводят известную из механики гамильтонову функцию:

$$H = \sum_{i=0}^n \psi_i f_i(X; Y), \quad (13.8)$$

где $f_i(X; Y)$ при $i = \overline{1, n}$ - правые части уравнений математической модели объекта (13.5);

$f_0(X; Y)$ – интегрируемая функция критерия оптимальности;

ψ_0 – вначале неизвестная величина;

$\psi_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ – вначале неизвестные функции времени.

Необходимые условия отыскания оптимального решения:

а) $\psi_0 \leq 0$;

в) функции $\psi_i(t)$ должны быть решениями системы уравнений вида

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial x_{0i}}, \quad (13.9)$$

откуда определяются компоненты решения x_{0i} , то есть – оптимального управления входные воздействия на объект;

с) оптимальное управление $X_{\text{опт}}$ в любой момент времени должно обеспечивать

$$H = H_{\text{max}} \quad (13.10)$$

при указанных ограничениях (отсюда установилось наименование метода как *принципа максимума*);

d) в любой момент процесса оптимального управления

$$H \geq 0. \quad (13.11)$$

По физическому смыслу сущность оптимального управления на основе принципа максимума заключается в подводе к системе такого количества энергии, которое обеспечивает экстремум критерия оптимальности и заданный закон изменения состояния системы, например переход ее из одного состояния в другое при ограничениях (13.7).

Пример 5. Рассмотрим более детально процесс непрерывного (или полунепрерывного) литья заготовок (рис.3.5, с.17), в ходе которого требуется стабилизировать уровень расплава в кристаллизаторе, и примем следующие обозначения:

q_1 - удельный приход расплава на единицу площади сечения кристаллизатора, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

$x_{01} = \omega$ – угловая частота вала электропривода слитка, сообщаемого последнему линейную скорость v (первый вход объекта), с^{-1} ;

$x_{02} = \omega'$ – ускорение того же электропривода (второй вход объекта), с^{-2} ;

$y_{01} = \Delta h_{\text{кр}}$ – отклонение уровня расплава в кристаллизаторе от заданного значения (первый выход объекта), м ; $y_{02} = v$ - скорость извлечения слитка из кристаллизатора (второй выход объекта), м/с :

z - технологическое возмущение, воздействующее на состояние процесса литья и на отклонение уровня расплава в кристаллизаторе, м/с.

Задача заключается в том, чтобы в ответ на действие возмущения так изменять режим работы электродвигателя системы извлечения слитка из кристаллизатора, чтобы в кратчайшее время приводить уровень расплава к его заданному значению.

Составим математическую модель рассматриваемой системы:

$$\begin{aligned} \frac{dy_{01}}{dt} &= q_1 + z - y_{02}; \\ \frac{dy_{02}}{dt} &= a, \end{aligned} \quad (13.12)$$

где $a = \frac{dv}{dt}$ – ускорение слитка, м/с².

Критерий оптимальности

$$I = \int_0^{\tau_y} f_0(X; Y) dt \rightarrow \min \quad (13.13)$$

при $f_0(X; Y) = 1$ (максимальное быстродействие).

Представим в развернутом виде гамильтонову функцию (13.8):

$$H = \psi_0 + \psi_1(t) \cdot (q_1 + z - y_{02}) + \psi_2(t) \cdot a \rightarrow \max \quad (13.14)$$

и определим функции ψ_1 и ψ_2 .

Предварительно примем во внимание что $q_1 = v$ при $z = 0$ и $h_{кр} = \text{const}$, соответственно чему уточнятся знаки перед вторым слагаемым правой части (13.14): “плюс” при $z > 0$, когда $dh_{кр}/dt > 0$ (уровень расплава в кристаллизаторе повышается), и “минус” при $z < 0$, когда $dh_{кр}/dt < 0$.

При этом имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1(t)}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial y_{01}}; \\ \frac{d\psi_2(t)}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial y_{02}}. \end{aligned} \quad (13.15)$$

Отсюда с учетом (13.14)

$$\frac{d\psi_1(t)}{dt} = 0; \quad (13.16)$$

$$\frac{d\psi_2(t)}{dt} = +\psi_1(t) \quad \text{при } z > 0; \quad (13.17)$$

$$\frac{d\psi_2(t)}{dt} = -\psi_1(t) \quad \text{при } z < 0. \quad (13.18)$$

Из уравнения (13.16) следует, что в соответствии со знаком при

$$\psi_1(t) = \pm C_1,$$

а из уравнений (13.17), (13.18)

$$\psi_2(t) = \pm(C_1 \cdot t + C_2),$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Следовательно, выражение (13.14) в зависимости от знака z приобретает вид

$$H = \psi_0 \pm C_1(q_1 + z - v) \pm (C_1 t + C_2) \cdot a \rightarrow \max \quad (13.19)$$

При $z > 0$ условия H_{\max} и $H > 0$ выполняются при $a = a_{1\max}$ (максимальный разгон слитка), а при $z < 0$ для удовлетворения тех же условий требуется $a = -a_{2\max}$ (скорейшее торможение слитка). Удовлетворение этих условий за счет поддержания $+(\omega_1')_{\max}$ или $-(\omega_2')_{\max}$ действительно обеспечивает максимальное быстрое действие приведения уровня расплава в кристаллизаторе к его заданному значению.

Допустимые пределы ускорения электропривода машины непрерывного литья определяются технологическими факторами. Превышение предела $a_{1\max}$ при высокой скорости слитка грозит его обрывом, и наоборот, при малой скорости слитка чрезмерное замедление скорости его движения ниже предела $-a_{2\max}$ вызывает переохлаждение затвердевшей корочки металла и образование трещин термического происхождения.

Конкретные значения допустимых пределов $\pm a_{\max}$ зависят от механических свойств металла (сплава), сил трения между поверхностью слитка и стенками кристаллизатора, а также от условий охлаждения слитка.

В частности, при разгоне привода

$$\sigma_f + \sigma_T + \frac{ma_{1\max}}{S} \leq \sigma_B, \quad (13.20)$$

где m – масса слитка от начала образования корочки до опасного в отношении обрыва сечения, кг;

S – площадь поперечного сечения корочки или слитка, м^2 ;

σ_B – допустимое значение прочности на растяжение материала слитка при данной температуре, Па;

σ_f – напряжение трения, Па;

σ_T – термическое напряжение растяжения, Па .

13.2.Динамическое программирование

Динамическое программирование как метод решения оптимизационных задач в различных сферах человеческой деятельности разработан Ричардом Беллманом (США, 1952).

В аналитическом представлении динамическое программирование базируется на математическом аппарате, в известной степени эквивалентном используемому в принципе максимума. Однако с самого начала этот метод развивался в численном представлении с целью его непосредственной реализации с помощью средств вычислительной техники. При этом процедура решения оптимизационной задачи расчленяется во времени или пространстве на отдельные этапы (стадии), а особенность метода заключается в том, что решение начинают с последнего этапа, постепенно приближаясь к первому. На каждом из таких этапов сравнивают различные варианты решения, отбирают оптимальный вариант, который запоминают, а неоптимальные варианты тут же отбрасывают, чтобы не перегружать память компьютера.

Таким образом, в численном представлении задача динамического программирования сводится к особому виду прибору возможных вариантов решения и выявлению оптимального варианта решения задачи в целом.

Сказанное можно иллюстрировать следующим примером.

Пример 6. Дано: k – стадийный процесс, на каждой из стадий которого принимается n решений. Пусть $k = 4$, $n = 2$.

Найти оптимальное для всех стадий (т.е. для задачи в целом) решение.

Решение

На стрелках дерева решений (рис.13.1) обозначены показатели оптимальности решений на отдельных стадиях задачи, например затраты на технологический процесс, тогда как общее оптимальное решение должно обеспечить минимум суммарных затрат.

При обычном подходе к решению задачи методом перебора всех возможных вариантов необходимо сравнить между собой $V = n^k = 16$ вариантов и выбрать из них наилучший. Отметим, что практически суммарное число вариантов может быть значительно больше. Например, при $k = 12$ и $n = 4$ имеем $V = 16,78 \cdot 10^6 \dots$, что уже представляет собой достаточно серьезную задачу.

Обращаясь к нашему примеру, будем искать оптимальное решение методом динамического программирования.

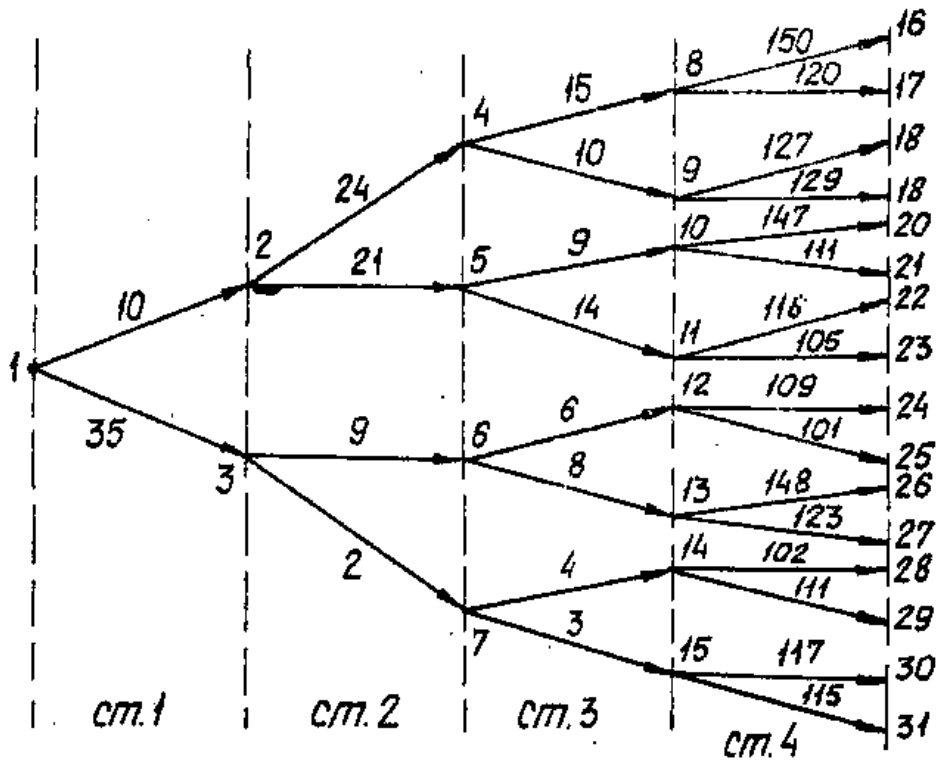


Рис.13.1. К решению примера 6 методом динамического программирования (ст.1 ... ст.4 – стадии процесса)

Сравним попарно варианты решений, принимаемых в каждой из точек 8...15 последней, четвертой, стадии задачи. Данные, характеризующие решения с наименьшими затратами, подчеркнуты (табл.13.1). Остальные данные этой стадии задачи интереса не представляют и из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Произведем далее сравнение возможных вариантов для точек 4...7 с учетом последующего продвижения к общему решению задачи, затем для точек 2 и 3, т.е. от стадии 4 до стадии 1 включительно.

В соответствии с принципом оптимальности Беллмана заключаем, что оптимальное решение на 3-й стадии представлено отрезком 7...14, на 2-й стадии – 3...7, а глобальная оптимальная траектория вырисовывается в виде ломаной 1 – 3 – 7 – 14 – 25 со значением минимизируемого критерия оптимальности

$$I = 35 + 2 + 4 + 102 = 143 = \min.$$

Варианты решений на отдельных стадиях процесса

4 -	3 -	2 -	1 -
150 <u>120</u>	+15 = <u>135</u>	+24 = 159	
<u>127</u> 129	+10 = <u>137</u>		
147 <u>111</u>	+ 9 = 120		
116 <u>105</u>	+14 = <u>119</u>	+ 21 = <u>140</u>	
109 <u>101</u>	+ 6 = <u>107</u>	+ 9 = 116	
<u>123</u> 148	+ 8 = <u>131</u>		+ 10 = 150
<u>102</u> 111	+4 = <u>106</u>	+2 = <u>108</u>	
117 <u>115</u>	+3 = 118		

Пример 7. Дано: индукционная печь для плавки цветных металлов и сплавов характеризуется математической моделью [7]

$$\frac{d\theta}{dt} = -0,6 \cdot \theta + P, \quad (13.21)$$

где θ - температура, °С (выход системы);

P – подводимая к печи электрическая мощность, кВт (управляющий вход).

Найти оптимальное управление $P(t)$, при котором данная система переходит из состояния $\theta(0) = 0$, °С в состояние $\theta(T) = 1000$, °С за время $T = 1$ ч.

Решение

Заметим, что здесь мы имеем случай, отличающийся от рассмотренного в предыдущем примере тем, что траектория $\theta(t)$ имеет закрепленными оба своих конца, соответствующих начальному и конечному состояниям системы, и продолжительность переходного процесса фиксирована (задача с ограничениями).

Критерий оптимальности (функционал) задан в виде

$$I = \int_0^T [(\theta - \theta^*)^2 + 1,56(P - P^*)^2] dt, \quad (13.22)$$

где θ^* - заданная температура; °С; P^* - “экономичная” мощность печи, кВт.

Критерий (13.22) по смыслу аналогичен выражению (13.2) и направлен на минимизацию как ошибок в соблюдении требуемого температурного режима печи, так и расхода электроэнергии на плавку.

Поскольку $\theta^* = \text{const}$; $P^* = \text{const}$, критерий (13.22) можно упростить, представить его в форме

$$I' = \int_0^T (\theta^2 + 1,56 \cdot P^2) dt \rightarrow \min \quad (13.23)$$

Для поиска оптимального решения квантуем время t и температуру θ шагами

$$\Delta t = 0,2 \text{ ч.}; \quad \Delta \theta = 250 \text{ °С},$$

как это показано на рис. 13.1.

Выражение (13.21) преобразуем в его конечно – разностный эквивалент

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = -0,6\theta + P, \quad (13.24)$$

где $\Delta \theta = \theta - \theta_n$ – приращение температуры за n - й шаг по времени относительно начального на этом шаге значения температуры θ_n , °С.

Тогда численное приращение функционала I' за шаг по времени

$$\begin{aligned} \Delta I' &= (\theta_n^2 + 1,56P_n^2) \cdot \Delta t = \left[\theta_n^2 + 1,56 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t} + 0,6\theta_n \right)^2 \right] \Delta t = \\ &= \left[1,56 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right)^2 + 1,872 \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right) \theta_n + 1,36\theta_n^2 \right] \Delta t, \end{aligned} \quad (12.25)$$

где P_n - мощность в начале n - го шага по времени, кВт.

Движение по вертикали исключим, так как в этом случае при $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta \theta \rightarrow \infty$ будет иметь место $\Delta I' \rightarrow \infty$, тогда как по условиям задачи требуется минимизировать значение этого функционала.

Решение задачи методом динамического программирования начнем с конечной траектории $\theta(t)$, то есть 10×10^2 , °С, при $T = 1$ ч.

Подсчитаем приращения функционала (15.35) на пути в эту точку из различных промежуточных точек при $t = 0,8$ ч на последнем шаге по времени.

Далее переходим к предпоследнему шагу по времени, начиная с момента $t = 0,6$ ч.

Здесь над отрезками траекторий цифрами без скобок показаны значения $\Delta I'$ на данном шаге, а в скобках – с учетом предыдущего шага, то есть при движении в направлении от конца траектории к её началу. Для каждой из промежуточных точек выбираем условно оптимальные значения $\Delta I'$ (обведены прямоугольниками) и определяем соответствующие им условно оптимальные участки траектории. Окончательная оптимальность устанавливается в конце решения. Если выбора нет (при $\theta = 10 \cdot 10^2$, °С), обвод данных прямоугольником не применяем.

Аналогичным образом поступаем еще на один шаг ближе к началу (с момента $t = 0,4$ ч) и т.д.

Принятие окончательного решения проводим с учетом принципа оптимальности Беллмана: если, например, подходим к точке α из различных предшествующих точек, то далее путь только один – по линии наименьшего приращения функционала. Это сокращает число вариантов перебора.

Окончательно вырисовывается общая оптимальная траектория изменения температуры во времени, отмеченная двойной линией, которая отвечает наименьшему значению $\Delta I' = 292,6$ за время движения из точки 0 в точку В. Эта траектория обеспечивается соответствующим изменением мощности P в процессе плавки.

При всех достоинствах метода динамического программирования следует отметить невозможность его практической реализации при весьма большом числе сравниваемых вариантов.

Рассмотренные примеры позволяют согласиться с определением метода динамического программирования, данным Р. Беллманом: “Любой отрезок оптимальной траектории является оптимальным, а будущее состояние системы не зависит от ее предыстории, то есть от состояния до начала управления”.

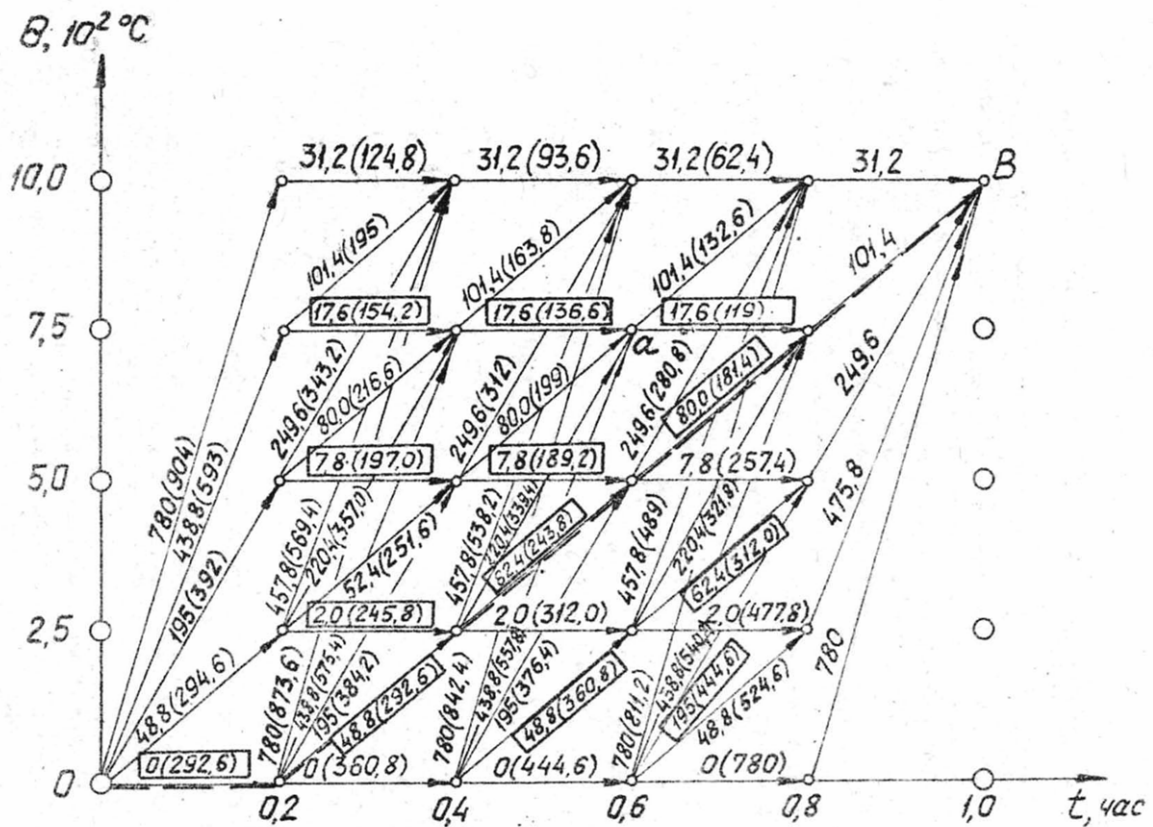


Рис.13.2. К определению оптимального режима индукционной печи методом динамического программирования

14. Особенности автоматизации процесса производства алюминия

Как известно, процесс получения алюминия осуществляют электролизом раствора глинозема (6...8% Al_2O_3) в расплаве криолита (Na_3AlF_6) при температурах 940 ... 965°C. В раствор при различных технологиях добавляют 5...6% смеси фторидов алюминия, калия, магния и (иногда) лития. Электролиз производится в *электролизёрах*, ванна которых выложена из огнеупорного кирпича и покрыта угольными плитками. Такая ванна служит *катодом* (К). В расплав погружают *анод* (А) из угольной массы, самообжигающийся в процессе работы или предварительно обожженный с различными схемами подвода тока. Отдельные электролизёры соединяются последовательно в *серии* по 150...180 ванн, питаемые постоянным током до 150 кА от специальной выпрямительной станции.

Напряжение на электролизёре определяется выражением

$$U = I \cdot R_{\Omega}, \quad (14.1)$$

где I – ток серии А;

R_{Ω} – сопротивление электролита Ом;

E – обратная ЭДС, называемая также противо - ЭДС, или потенциалом разложения Al_2O_3 , В.

Последняя зависит от плотности тока, концентрации глинозема в электролите, активности угольного анода.

Значение E непосредственно измерить невозможно. Один из известных способов ее определения основан на статистической обработке данных о значениях U , I с выделением гармоник характерной частоты с помощью специальных фильтров, например Калмана.

Фильтры вообще нужны для получения усредненных оценок тока и напряжения на электролизёрах из-за сильного взаимного влияния ванн в последовательной цепи.

В прогрессивных решениях ток серии I измеряют непосредственно, например, с помощью специального измерителя фирмы “Халмер”.

Сопротивление R_{Ω} также не является постоянным, а зависит от концентрации Al_2O_3 и межполюсного расстояния $L_{мпр}$ (промежутка между анодом и катодом электролизёра). При некотором среднем значении $L_{мпр}$ характеристики электролизера как технологического объекта управления (ТОУ) схематично изображены на рис.14.1.

В процессе электролиза имеет место электрохимическая реакция



Алюминий осаждается на поверхности ванны (катоде), а кислород выделяется на угольном аноде, образуя с углеродом последнего CO , CO_2 .

По мере расходования глинозема его сопротивление R_{Ω} уменьшается, противо - ЭДС возрастает, а напряжение на электролизере изменяется согласно данным рис. 14.1.

При достаточном содержании в ванне глинозема электролизёр работает нормально при напряжении 4...4,5 В. Однако при снижении концентрации $Al_2O_3 < 1...1,5$ % напряжение на электролизёре резко возрастает. Если не принять мер, может достичь значения 50 В (анодный эффект).

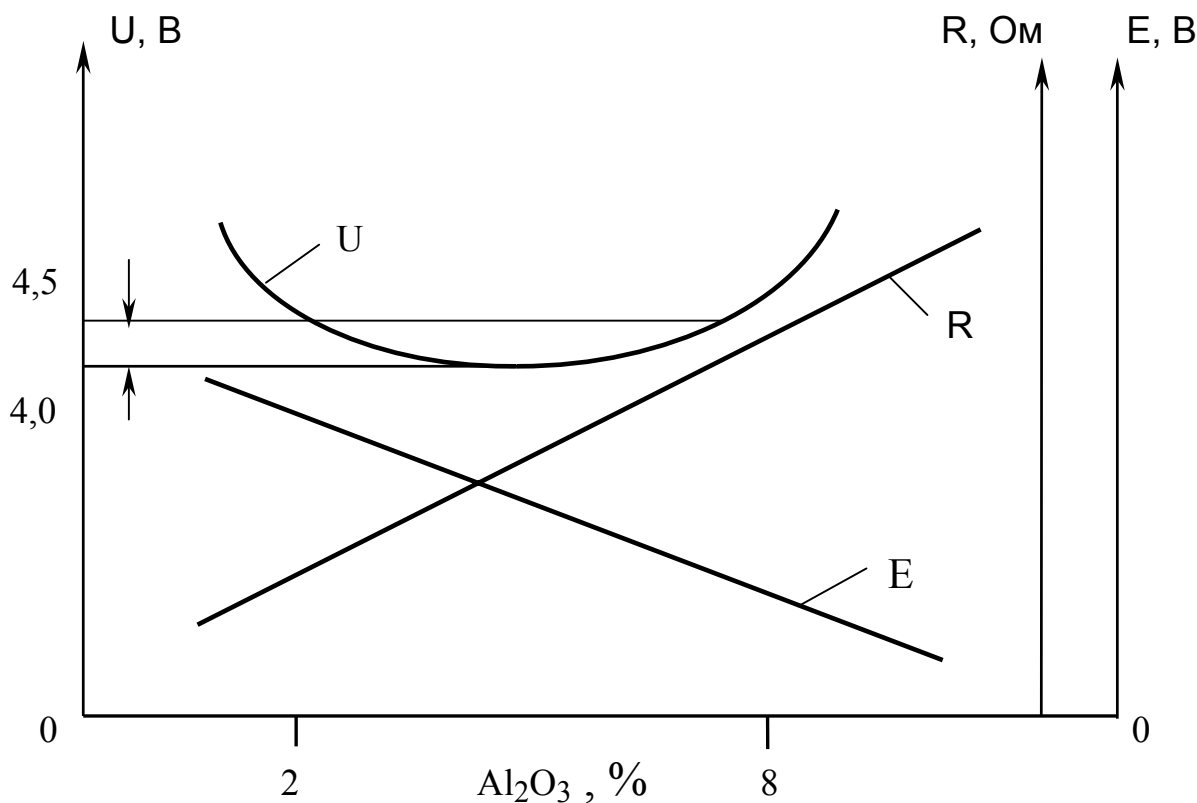


Рис. 14.1. Электрические характеристики электролизёра

При этом уменьшается смачиваемость электродов и возникают нежелательные изменения в ходе электрохимических процессов.

В качестве мер, предотвращающих анодные эффекты или снижающих их частоту, применяют следующие воздействия:

- 1) регулируют напряжение на электролизере путем перемещения анода с помощью электропривода (энергетический режим).
- 2) регулярно загружают в ванну порции глинозема (концентрационный режим).

Эти воздействия на рассматриваемый объект управления являются *входными*.

Цель управления процессом электролиза заключается в том, чтобы выделить каждой ванне свою долю общего напряжения серии. Тем самым существенно ослабляется влияние ванн друг на друга, и повышается технико-экономическая эффективность процесса производства алюминия.

Для управления процессом электролиза достаточно широкое распространение получили иерархические двухуровневые АСУ ТП. Их нижний уровень образуют программируемые микропроцессорные контроллеры типа РЕМИКОНТ или им подобные. Один такой контроллер обслуживает группу электролизеров, обеспечивая циклический контроль и регулирование напряжения на ваннах, управ-

ление пробойниками корки на поверхности электролита, питателями и дозаторами ввода глинозема и фторсолей. Всего на серии электролизеров устанавливается несколько микропроцессорных контроллеров. Посредством обычной проводной связи или – локальной вычислительной сети контроллеры нижнего уровня связываются с центральным компьютером типа современного IBM - совместимого, представляющим верхний уровень АСУ ТП. Здесь производится централизованная обработка всей информации о ходе технологических процессов, наглядное её отображение на экране монитора, различных табло и мнемосхемах. Вся информация фиксируется в распечатках с привязкой к текущему времени.

В составе АСУ ТП осуществляются:

- 1) усреднение и цифровая фильтрация сигналов;
- 2) контроль за возникновением магнитогидродинамической неустойчивости в отдельных ваннах с выработкой корректирующих воздействий на задаваемые значения сопротивлений R_3 ;
- 3) расчётное (по ситуации) оценивание концентрации глинозема в электролите;
- 4) контроль, прогноз, обнаружение анодных эффектов, их предупреждение или ликвидация;
- 5) выработка управляющих воздействий на включение электропривода анодов и частоту питания ванн глиноземом.

Для повышения эксплуатационной надёжности АСУ ТП в её структуре должно быть обеспечено резервирование элементов и каналов связи (дублирование и троирование), автодиагностика системы, интерактивное взаимодействие с оператором для возможной корректировки работы автоматических устройств.

Использование локальных вычислительных сетей позволяет интегрировать АСУ ТП в состав АСУП алюминиевого завода.

Библиографический список

1. Дембовский В.В. Автоматизация литейных процессов. – Л: Машиностроение, 1989.
2. Дембовский В.В. Компьютерные технологии в металлургии и литейном производстве: Учеб. пособие в 2 – х ч. - СПб.: 2002.
3. Дембовский В.В. Моделирование и оптимизация технологических систем и процессов. Математическое моделирование литейных процессов с применением ЭВМ. –Л.: СЗПИ, 1991.
4. Дембовский В.В. Моделирование и оптимизация технологических систем и процессов. Оптимизация литейных процессов с применением ЭВМ. – Л.: СЗПИ, 1991.
5. Глинков Г.М., Климовицкий М.Д. Теоретические основы автоматического управления металлургическими процессами. – М.: Металлургия, 1985.
6. Проектирование систем контоля и автоматического регулирования металлургических процессов / под ред. Г.М.Глинкова. – М.:Металлургия, 1986
7. Салыга В.И., Карабутов Н.Н. Идентификация и управление процессами в чёрной металлургии. – М. : Металлургия, 1986.
Климовицкий М.Д. Оптимизация работы нагревательных печей. – М.: металлургия, 1965.

Вопросы для самопроверки

К главе 1. **Важнейшие свойства систем управления и их общая классификация**

- 1) Назовите различия в свойствах систем в зависимости от их структуры.
- 2) Приведите преимущества замкнутой системы, по сравнению с разомкнутой.
- 3) Почему практически все системы автоматического регулирования строятся по замкнутой схеме?
- 4) Какую систему называют импульсной?
- 5) В чём заключается принцип программного регулирования?

К главе 2. **Функциональная блок – схема САР**

- 1) Какие физические величины являются входными для объекта и регулятора?
- 2) Что называют возмущением?
- 3) Может ли система автоматического регулирования функционировать без датчика?
- 4) Для чего предназначена дополнительная обратная связь по выходу усилителя в составе автоматического регулятора?
- 5) Какой вид обычно имеет исполнительный механизм в гидравлических и пневматических системах?

К главе 3. **Свойства технологических объектов управления**

- 1) Чем отличается статический объект от астатического?
- 2) Какой график называют кривой разгона объекта?
- 3) Какова связь между кривой разгона объекта и его дифференциальным уравнением?
- 4) Что характеризует постоянная времени объекта?
- 5) Как определить постоянную времени объекта?

К главе 4. **Свойства автоматических регуляторов**

- 1) По какому признаку регуляторы относят к категории линейных или нелинейных?
- 2) Каковы достоинства и недостатки пропорциональных регуляторов?
- 3) Можно ли применить интегральный регулятор на астатическом объекте?
- 4) Каково различие между временем удвоения и условной постоянной времени интегрирования у пропорционально – интегрального регулятора?
- 5) Какие свойства придаёт регулятору дополнительное воздействие на объект по первой производной его выхода?

К главе 5. **Преобразование дифференциальных уравнений в операторную форму. Понятие о передаточной функции**

- 1) Что представляет собой дифференциальный оператор?
- 2) Как его используют при преобразовании дифференциального уравнения в операторную форму?
- 3) При каких условиях передаточная функция превращается в передаточный коэффициент?
- 4) Как используют дифференциальный оператор, если оригинал функции содержит интеграл?
- 5) Какой вид имеет передаточная функция звена чистого запаздывания?

К главе 6. **Способы соединения элементов в системах**

- 1) Как определить общий передаточный коэффициент системы, состоящей из последовательно соединённых элементов?
- 2) Чем отличается положительная обратная связь от отрицательной?
- 3) Напишите выражение передаточной функции замкнутой системы.
- 4) В чём различие в передаточных функциях систем автоматического регулирования при изменении задания и при воздействии возмущения на вход объекта?
- 5) Как влияет наличие чистого

запаздывания объекта на вид передаточной функции системы автоматического регулирования?

К главе 7. Устойчивость замкнутых систем

1) Что подразумевают под устойчивостью замкнутой системы? 2) Каковы причины возможной потери устойчивости? 3) Какими способами обеспечивают условия устойчивости системы при её синтезе (проектировании)? 4) Какой критерий устойчивости является универсальным? 5) Если годограф амплитудно – фазовой характеристики разомкнутой системы с ростом частоты охватывает точку с координатами $-1, i \cdot 0$, то устойчива ли та же система в замкнутом состоянии?

К главе 8. Показатели качества регулирования

1) Назовите и охарактеризуйте показатели качества регулирования. 2) В чём особенность выбора переходного процесса с 20 - процентным перерегулированием? 3) В чём заключается смысл интегрального квадратичного критерия качества регулирования? 4) Какая величина входит под знаком интеграла в составе последнего? 5) Когда настраивают регулятор на апериодический переходной процесс с минимальным временем регулирования?

К главе 9. Оптимизирующее регулирование

1) На каких объектах целесообразно применять автоматические оптимизаторы? 2) Опишите процесс автоматической оптимизации теплового режима вагранки. 3) В чём преимущество шагового движения исполнительного механизма в процессе поиска оптимума? 4) Каким образом можно уменьшить потерю на поиск оптимума? 5) Для чего необходима фильтрация сигнала на входе автоматического оптимизатора?

К главе 10. Элементы техники автоматизации производственных процессов

1) Что такое РЕМИКОНТ, и для каких целей применяют такие устройства? 2) Что понимают под мультипроцессорностью? 3) Для чего применяют автоконтроль и авторезервирование в многоканальных системах управления? 4) Охарактеризуйте машину – автомат литейного производства. 5) Чем отличается ЛОМИКОНТ от РЕМИКОНТА?

К главе 11. Промышленные манипуляторы и роботы

1) Чем отличается промышленный манипулятор от промышленного робота? 2) Какие технические органы зрения применяются в современных промышленных роботах? 3) Назовите предельное число степеней подвижности у руки промышленного робота и руки человека. 4) Из каких функциональных элементов состоит промышленный робот? 5) Приведите примеры использования промышленных роботов в литейном производстве.

К главе 12. Автоматизированные системы управления

1) Опишите общую схему АСУ ТП и назначение отдельных её элементов. 2) Для чего применяют преобразователи типа АЦП и ЦАП в составе АСУ ТП? 4) Каковы функции АСУП? 5) В чём заключается принцип интегрирования АСУ ТП и АСУП в единую АСУ литейного предприятия?

К главе 13. Методы оптимального управления технологическими процессами

1) Чем отличаются методы динамической оптимизации от методов статической оптимизации? 2) Какие критерии оптимизации используются в современных методах управления? 3) В чём заключается *принцип максимума* и почему он так называется? 4) Каков физический смысл поясняет принцип максимума? 5) Какая ведущая идея заложена в метод *динамического программирования*?

К главе 14. Особенности автоматизации процесса производства алюминия

1) Какое сырьё используют при производстве алюминия? 2) Как устроен электролизёр? 3) В каких пределах поддерживают содержание Al_2O_3 в электролите? 4) При каком напряжении осуществляют процесс электролиза? 5) Какие управляющие воздействия используются для эффективного протекания процесса получения алюминия?

Предметный указатель

		А		
Автоматизация	3	Алгоритм регулирования	20,23	
Автоматика	3	Алюминий	71	
Автоматизированные системы управления	51	Аналого – цифровой преобразователь	53	
Авторезервирование	48	Астатические объекты	11	
		Б		
Бесконтактные устройства	48	Быстродействие системы	59	
		В		
Вагранка	44	Время регулирования	42,43	
Возмущение	5	Вторичный прибор	8	
		Г		
Годограф амплитудно – фазовой характеристики	40			
		Д		
Датчик	7,8	Дополнительная обратная связь	8	
Динамическое программирование	66	Доход приведённый	57	
Дифференциальные уравнения	11			
		Ж		
Жесткая программа движений	48			
		З		
Задатчик	7,8	Запаздывание	18	
Замкнутая система	4,7			
		И		
Интегральный квадратичный критерий	42	Интегрированная АСУ	56	
		К		
Коммутатор	53	Кривая разгона	9	
Критерий устойчивости	36,40	Критерий оптимальности	59	
		Л		
Ломиконт	48			
		М		
Манипулятор	48	Мультипроцессорность	47	
Моделирование	36			
		Н		
Неустойчивость системы	41			

		О	
Обратная связь	4,32	Оптимальное управление	59
Оптимальная настройка регулятора		Оптимизирующее регулирование	
		П	
Перерегулирование	42	Постоянная времени	12,13
Передаточный коэффициент	9,13	Принцип максимума	61
Передаточная функция	27,33	Прямая связь	4
Показатели качества регулирования	42		
		Р	
Регулирование	6,20	Ремиконт	47
Регулирующий орган	7,9	Робот промышленный	49
		С	
Статические объекты	11		
		Т	
Технологический объект управления	4		
		У	
Усилитель рассогласования	6	Устойчивость замкнутых систем	35
		Ф	
Функции частотные	37, 39	Функция целевая	59
		Х	
Характеристики:			
– временные	10		
– частотные	37		
		Ц	
Цифро – аналоговый преобразователь	53		
		Э	
Электролизёр	71	Элемент сравнения	6
Экстремальное регулирование	6		

ОГЛАВЛЕНИЕ

	с.
Предисловие	3
1. Важнейшие свойства систем управления и их общая классификация	4
2. Функциональная блок – схема САУ	6
3. Свойства технологических объектов управления	9
4. Свойства автоматических регуляторов	20
5. Преобразование интегро – дифференциальных уравнений в операторную форму. Понятие о передаточной функции	27
6. Способы соединения элементов в системах	29
7. Устойчивость замкнутых систем	35
8. Показатели качества регулирования	42
9. Оптимизирующее регулирование	44
10. Элементы техники автоматизации производственных процессов	46
11. Промышленные манипуляторы и роботы	48
12. Автоматизированные системы управления	51
13. Методы оптимального управления технологическими процессами	59
14. Особенности автоматизации процесса производства алюминия	71
Библиографический список	75
Вопросы для самопроверки	76
Предметный указатель	79

Дембовский Владислав Владиславович

**Автоматизация
управления производством**

Учебное пособие

Редактор И.Н.Садчикова

Сводный темплан 2004 г.

Лицензия ЛР № 020 308 от 14.02 97

Санитарно - эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03 от
21.11.2003г.

Подписано в печать

Формат 60 x 84 1/16

Б. кн.- журн. П.л.

Б.л.

РТП РИО СЗТУ

Тираж

Заказ

Северо – Западный государственный заочный технический
университет
РИО СЗТУ, член Издательско – полиграфической ассоциации
вузов Санкт – Петербурга
191186, Санкт – Петербург, ул.Миллионная, 5