

# Оглавление

## [Введение](#)

### [1. Оформление пояснительной записки и чертежей](#)

### [2. Математическое описание автоматизированной системы](#)

#### [2.1. Определение параметров объекта автоматизации при активном эксперименте](#)

#### [2.2. Алгоритмы функционирования регуляторов. Расчет и выбор настроек регуляторов](#)

### [3. Проектирование исполнительных механизмов](#)

#### [3.1. Принципы управления исполнительными системами](#)

#### [3.2. Постановка задачи синтеза системы управления](#)

#### [3.3. Синтез электромеханического модуля методом амплитудно-частотных характеристик](#)

#### [3.4. Статический расчет ЭММ](#)

### [4. Ход работы курсового проекта на примере АСР уровня](#)

#### [раствора в баке](#)

#### [Приложение 1 Варианты заданий](#)

#### [Приложение 2 Параметризация моделей второго порядка по переходной характеристике](#)

#### [Список рекомендуемой литературы](#)

## **Введение**

Одним из главных средств интенсификации современной экономики является концентрация ресурсов на важнейших направлениях научно-технического прогресса, к которым отнесена и комплексная автоматизация производства. Автоматизация современного производства основана на использовании гибких производственных систем, автоматических линий, станков с ЧПУ, промышленных роботов и эффективного применения современных программных средств и компьютерных систем управления. Создание конкурентоспособной продукции, пользующейся спросом на мировом рынке, неизбежно связано с интенсификацией технологических процессов, с разработкой специального оборудования, оснащенного системами управления.

Характерные особенности современного этапа автоматизации будут состоять в том, что она должна опираться на революцию в электронно-вычислительной технике, на самое широкое использование мини- и микро-ЭВМ, а также на быстрое развитие робототехники и мехатронных устройств.

Применение современных средств и систем автоматизации позволяет решать следующие задачи:

- вести процесс с производительностью, максимально достижимой для данных производительных сил, автоматически учитывая непрерывные изменения технологических параметров, свойств исходных материалов и полуфабрикатов, изменений в окружающей среде, ошибки операторов;
- управлять процессом, постоянно учитывая динамику производственного плана для номенклатуры выпускаемой продукции путем оперативной перестройки режимов технологического оборудования, перераспределения работ на однотипном оборудовании и т.п.;
- автоматически управлять процессами в условиях, вредных или опасных для человека.

Общая структура разрабатываемого курсового проекта включает в себя введение и разделы: научно-исследовательский (теоретическое обоснование, экспериментальная часть, применение ЭВМ, патентный

поиск), основной раздел по проектированию автоматизированных систем, а также выводы и рекомендации, список литературы. Введение как раздел проекта составляется после разработки всех частей проекта.

Если проект связан с решением многосторонней инженерной задачи на уровне технического проектирования, то следует отметить реальность проекта. Желательно привести ожидаемый технико-экономический эффект осуществления проекта. Если в проекте предложены разработки на уровне изобретений, новизна которых подтверждена авторскими свидетельствами, то следует указать их номера и дату выдачи. Объем рукописного текста введения не должен превышать пять страниц.

## 1. Оформление пояснительной записки и чертежей

### Требования к оформлению пояснительной записки.

1. Все страницы записки должны быть одинакового размера 210 × 297 мм (формат А4). Рукопись пишут на одной стороне листа чернилами или пастой.

2. Расстояние от границ листа до границ текста следует оставлять: слева — 20...25 мм, сверху и снизу — 5...10 мм, справа — не менее 5 мм.

3. План записки должен соответствовать последовательной работе над проектом. Заголовки разделов должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами. Подразделы должны иметь двузначную нумерацию в пределах каждого раздела. Подразделы могут иметь несколько пунктов.

Например:

1. Исходные данные для проектирования.
2. Определение основных параметров автоматизированной системы.
  - 2.1. Алгоритмы функционирования регуляторов.
  - 2.2. Расчет и выбор настроек регуляторов и т.д.

4. Расчетные формулы записывают в буквенных обозначениях с экспликацией, в которой приводят наименование каждой величины, входящей в формулу, и единицу СИ:

правильно

$$M_{F_{3c}}^{\text{пр}} = F_{3c} l_1 (v_C / v_B),$$

где  $M_{F_{3c}}^{\text{пр}}$  — приведенный момент, **Н·м**;  $F_{3c}$  — сила сопротивления, **Н**;  $l_1$  — радиус кривошипа, **м**;  $v_C / v_B$  — отношение линейных скоростей точек *C* и *B*;

неправильно

$$M_{F_{3c}}^{\text{пр}} = F_{3c} l_1 (v_C / v_B), \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{F_{3c}}^{\text{пр}} = F_{3c} l_1 (v_C / v_B), [\text{Н} \cdot \text{м}].$$

правильно

$$[M_{F_{3c}}^{\text{пр}}] = \text{Н} \cdot \text{м}; [F_{3c}] = \text{Н};$$

$$[v_C / v_B] = 1; [l_1] = \text{м}.$$

Затем в формулу подставляют необходимые числовые значения и приводят результат вычислений с указанием единицы СИ, например:

$$M_{F_{3c}}^{\text{пр}} = F_{3c} l_1 (v_C / v_B) = F_{3c} l_1 (p_c / p_b) = 1370 \cdot 0,035 (27/60) = 21,58 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Формулы нумеруются, если в записке необходимо делать ссылки. Нумерацию целесообразно указывать в пределах определенной главы (например, 1.5; 3.2 и т.п.).

5. Буквенные обозначения единиц СИ, входящих в произведение, следует отделять точками на средней линии строки, например Н·м. При применении буквенных обозначений единиц СИ в виде отношений должна применяться только одна косая или горизонтальная черта, например:

$$\text{правильно } \frac{\text{мм}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}}; \text{ неправильно } \frac{\text{мм}}{\text{м} / \text{с}^2}; \text{ мм/м/с}^2.$$

При применении косой черты обозначения единиц СИ в числителе и знаменателе следует помещать в строку, а произведение в знаменателе следует заключать в скобки, например  $\frac{\text{мм}}{\text{м} \cdot \text{с}^{-2}}$ ;  $\frac{\text{мм}}{(\text{кг} \cdot \text{м}^2)}$ .

6. Задание функций и результаты решения уравнения с большим объемом числовых данных рекомендуется приводить в записке в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь заголовок, отражающий

содержание таблицы, а также заголовки боковиков и граф.

7. Небольшой по объему цифровой материал удобнее оформлять в строку (колонки разделяются не линейками, а пробелами).

8. Основной текст записки должен быть кратким, четким, но достаточным для точного и конкретного отражения содержания расчетов, графических построений и выводов.

9. Записка должна содержать ссылки на использованную литературу, список которой приводят в конце записки.

10. Все страницы записки брошюруют в обложку и нумеруют. Записка должна иметь титульный лист установленной формы.

11. В начале записки поместить «Аннотацию» или «Реферат» — краткую информацию о содержании записки в виде перечня главнейших вопросов с выделением ключевых слов.

В «Оглавлении» привести наименование разделов записки с указанием номеров страниц.

12. Текст записки пишется от третьего лица или в безличной форме: например: «определяют», «определяется», «определение». Форма «определяю» недопустима.

13. Реферат должен содержать данные, необходимые для организации машинного банка информации с описанием краткого содержания записки с подчеркнутыми ключевыми словами, а также указания объема и количества текстовых, табличных и других листов и иллюстраций, используемых при копировании документов.

**Требования к оформлению графиков и схем.** При оформлении структурных, функциональных, принципиальных схем, схем автоматизации и чертежей необходимо руководствоваться ГОСТами ЕСКД 2.701–68, 2.721–74, 2.743–72, 2.747–68, 2.750–68, 2.751–73. На каждом листе работы в правом нижнем углу должна быть основная надпись по ГОСТ 2.104–68. Несоблюдение требований ЕСКД и ЕСПД оформлению иллюстраций говорит об их незнании, что приводит к снижению оценки за курсовой проект.

На каждом листе проекта в правом нижнем углу должна быть основная надпись по ГОСТ 2.104–2006.

**Организация защиты проекта.** Курсовой проект при окончательном оформлении подписывают студент и руководитель проекта. В процессе защиты студент кратко излагает назначение и принцип работы машины или установки и особенности принятых решений при исследовании и проектировании автоматизированной системы. В процессе обсуждения студент должен показать, что он овладел общими методами синтеза элементов автоматизированной системы, получил навыки выполнения конкретных расчетов, владеет аналитическими и численными методами исследования средств автоматизации, может обосновать целесообразность принятия конкретных решений при проектировании автоматизированных систем.

Защита курсового проекта проходит в комиссии в составе трех преподавателей, по ходу защиты ведется протокол заседания.

## **2. Математическое описание автоматизированной системы**

### **2.1. Определение параметров объекта автоматизации при активном эксперименте**

При активном эксперименте на объект исследования действуют типовые входные сигналы, т.е. ступенчатые, импульсные или гармонические воздействия.

Соответственно этим воздействиям определяются:

- временные характеристики (кривые разгона),
- время - импульсные,
- частотные характеристики.

Для объектов управления с самовыравниванием указанные характеристики приведены соответственно на рис. 1, а, б, в.

Величина ступенчатого воздействия, как правило, составляет 5...20% от номинального входного сигнала.

При определении параметров объектов управления по экспериментальным данным в большинстве случаев оказывается возможным приближенно оценивать свойства объектов тремя параметрами: коэффициентом усиления  $k_0$ , постоянной времени  $T_0$  и временем запаздывания  $\tau$ .

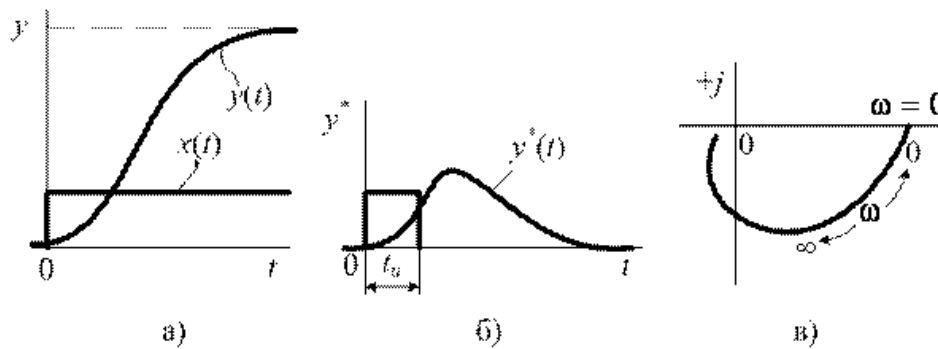


Рис. 1. Динамические

характеристики объекта с самовывравниванием:

а — временная; б — время-импульсная; в — амплитудно-фазовая

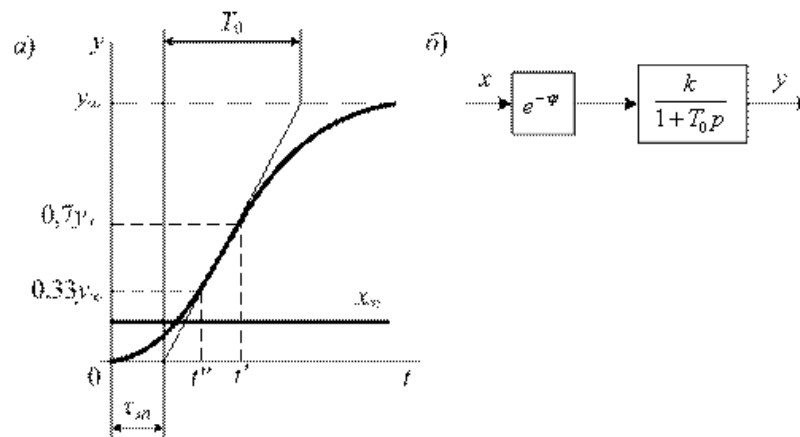


Рис. 2. Определение по экспериментальной временной характеристике параметров (а) и структуры (б) объекта управления

Если известна временная характеристика объекта (рис. 2, а), то структура и параметры объекта определяются заменой действительной характеристики эквивалентной, состоящей из участка запаздывания и экспоненты с постоянной времени  $T_0$ , подобранными так, чтобы аппроксимирующая характеристика наилучшим образом воспроизводила действительную временную характеристику. Передаточная функция такого объекта управления

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-ps}}{T_0 p + 1}, \quad (1)$$

а его структурная схема показана на рис. 2, б.

Более точную аппроксимацию временной характеристики можно получить, если  $\tau$  и  $T_0$  рассчитывать следующим образом: на временной характеристике (рис. 2, а) сначала определить моменты времени  $t'$  при  $y = 0,7y(\infty)$  и  $t''$  при  $y = 0,33y(\infty)$ , а затем вычислить параметры объекта по формулам

$$\tau = 0,5(3t'' - t'); \quad T_0 = 1,25(t' - t'') \quad (2)$$

Связь выхода в установившемся режиме  $y(\infty)$  от входа  $x(\infty)$  выражается через коэффициент усиления

$$k_0 = y(\infty)/x(\infty) \quad (3)$$

Если замена сложного дифференциального уравнения объекта более простым неприемлема, то для определения коэффициентов дифференциального уравнения и его порядка без участка запаздывания пользуются графо-аналитическим методом площадей (метод Симою). Этот метод легко программируется для ЭВМ и программа занимает весьма малый объем памяти. При наличии более точного математического описания объекта, полученного с использованием метода площадей, можно осуществить синтез структуры корректирующих устройств (регуляторов) и получить автоматическую систему высокого качества.

## 2.2. Алгоритмы функционирования регуляторов. Расчет и выбор настроек регуляторов

Автоматические регуляторы по своим динамическим свойствам подразделяются на линейные и нелинейные. При проектировании АСР с линейными регуляторами используют П, И, ПИ, ПД и ПИД

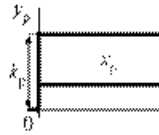
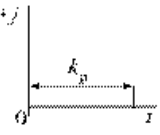
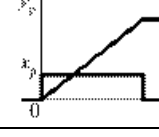
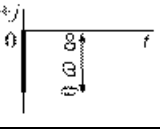
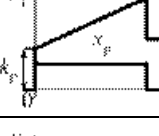
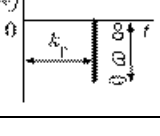
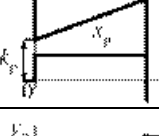
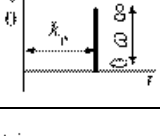
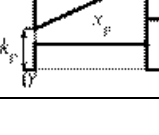
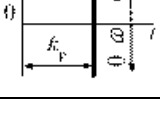
алгоритмы регулирования. Уравнения, передаточные функции, временные и частотные характеристики линейных регуляторов приведены в табл.1. Необходимым условием надежной устойчивой работы АСР является правильный выбор типа регулятора и его настроек, гарантирующий достаточный запас устойчивости и требуемое качество регулирования.

В качестве количественных мер запаса устойчивости используют степень колебательности

$$m = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — действительная и мнимая части наиболее «опасного» полюса передаточной функции замкнутой АСР соответственно (рис 3,а)

Таблица 1  
Передаточные функции, временные и частотные характеристики линейных регуляторов

Тип регулятора	Уравнение	Передаточная функция	Характеристика	
			временная	частотная
Пропорциональный (статический)	$y_p = k_p x_p$	$k_p$		
Интегральный (астатический)	$y_p = \frac{1}{T_n} \int x_p dt$	$\frac{1}{T_n p}$		
Пропорционально – интегральный (изодромный)	$y_p = k_p \left( x_p + \frac{1}{T_n} \int x_p dt \right)$	$k_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} \right)$		
Пропорционально – дифференциальный	$y_p = k_p \left( x_p + T_n \frac{dx_p}{dt} \right)$	$k_p (1 + T_n p)$		
Пропорционально – интегрально – дифференциальный	$y_p = k_p \left( x_p + \frac{1}{T_n} \int x_p dt + T_n \frac{dx_p}{dt} \right)$	$k_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_n p \right)$		

Наиболее опасным считается полюс с наименьшим значением  $m$ . Для границы устойчивости  $m = 0$ . Показатель колебательности  $M$  определяется по величине максимума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой АСР (рис. 3,б). Чем больше максимум АЧХ, тем выше колебательность системы. По переходным характеристикам замкнутой АСР (рис. 3,а) определяется степень затухания

$$\Psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}. \quad (5)$$

Для АСР на границе устойчивости  $\Psi = 0$ .

В целом все три показателя  $m$ ,  $M$ ,  $\Psi$  являются примерно равноценными мерами запаса устойчивости. Знание одного из них дает информацию о значениях других. Так, например, значениям  $m = 0,2 \dots 0,3$  соответствуют значения  $M = 2,5 \dots 1,5$  и  $\Psi \approx 0,7 \dots 0,9$ .

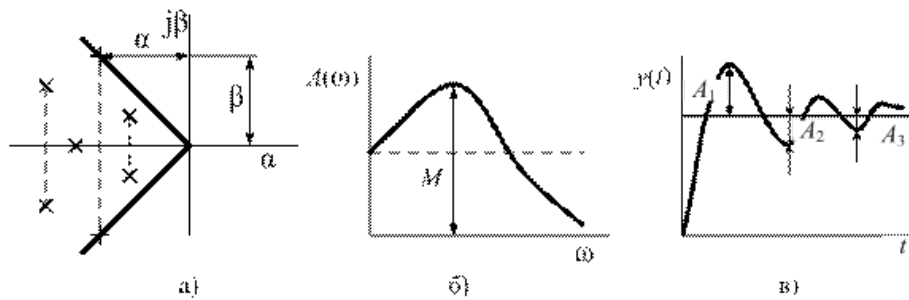


Рис. 3. Определение количественных мер запаса устойчивости АСР:  
а, б — по степени колебательности; в — по степени затухания

Показатели  $m$ ,  $M$  обычно применяются в расчетах, а показатель  $\Psi$  — при экспериментальных оценках запаса устойчивости.

При выборе типа регулятора предполагают, что в системе существует определенный переходный процесс:

- аperiodический без перерегулирования, который используется в случаях, когда требуется исключить влияние регулирующего воздействия данной системы на другие переменные сложного объекта;
- с 20%-ным перерегулированием, при котором обеспечивается малое время переходного процесса и первого полупериода;
- с минимальной интегральной квадратичной оценкой, при которой обеспечиваются наименьшие значения суммарного динамического отклонения.

В зависимости от свойств объектов управления, определяемых его передаточной функцией и параметрами, а также предполагаемым видом переходного процесса, выбирается тип и настройки линейных регуляторов.

Для статических объектов управления

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\Psi}}{T_0 p + 1}; \quad (6)$$

для астатических объектов управления

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\Psi}}{T_0^* p}; \quad (7)$$

где  $T_0^* = \frac{y_{\max}}{x_{\max}}$  — условная постоянная времени астатического объекта.

Основные области применения линейных регуляторов характеризуются следующим образом:

И-регулятор применяется со статическим объектом при медленных изменениях возмущений и с малым временем запаздывания  $\tau/T_0 < 0,1$ ;

П-регулятор применяют со статическим и астатическим объектами при любой инерционности и времени запаздывания, определяемым соотношением  $\tau/T_0 \leq 0,3$ ;

ПИ-регулятор применяется при любой инерционности объекта и времени запаздывания, определяемым условием  $\tau/T_0 \leq 1$ .

В табл. 2 приведены формулы выбора настроек  $k_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  основных регуляторов для статических объектов.

Таблица 2.

Формулы выбора настроек регуляторов для статических объектов

Применяемый регулятор	Предполагаемый переходный процесс		
	аperiodический	20%-ное перерегулирование	минимум интегральной квадратичной оценки
П-регулятор	$k_p = \frac{0,3}{k_0 \tau / T_0}$	$k_p = \frac{0,7}{k_0 \tau / T_0}$	$k_p = \frac{0,9}{k_0 \tau / T_0}$

ПИ-регулятор	$k_p = \frac{0,6}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = 0,6T_0$	$k_p = \frac{0,7}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = 0,7T_0$	$k_p = \frac{1}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = T_0$
ПИД-регулятор	$k_p = \frac{0,95}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = 2,4\tau;$ $T_d = 0,4\tau$	$k_p = \frac{1,2}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = 2\tau;$ $T_d = 0,4\tau$	$k_p = \frac{1,4}{k_0 \tau / T_0};$ $T_n = 1,3\tau;$ $T_d = 0,5\tau$

Графики переходных процессов в АСР с П- и ПИ-регуляторами приведены на рис. 4, а, б. При увеличении  $k_p$  уменьшаются отклонения, но увеличивается колебательность.

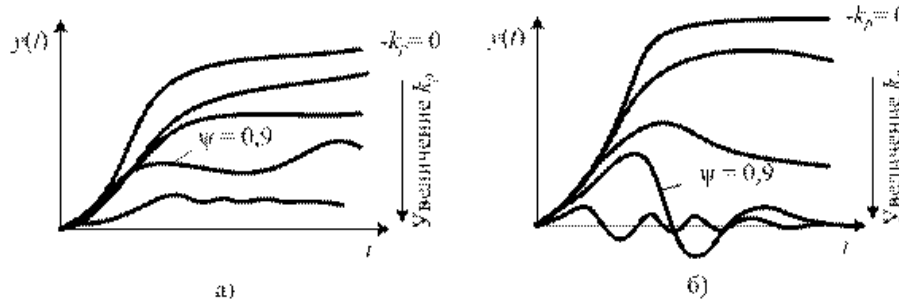


Рис. 4. Графики переходных процессов в АСР с П-регулированием (а) и с ПИ-регулированием (б) при различных значениях  $k_p$

В табл. 3 приведены формулы выбора настроек  $k_p$ ,  $T_n$ ,  $T_d$  основных регуляторов для астатических объектов.

Таблица 3.

Формулы выбора настроек регуляторов для астатических объектов

Применяемый регулятор	Предполагаемый переходный процесс		
	апериодический	20%-ное перерегулирование	минимум интегральной квадратичной оценки
П-регулятор	$k_p = \frac{0,4}{k_0 \tau / T_0^*}$	$k_p = \frac{0,7}{k_0 \tau / T_0^*}$	-
ПИ-регулятор	$k_p = \frac{0,4}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 6\tau$	$k_p = \frac{0,7}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 3\tau$	$k_p = \frac{1}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 4\tau$
ПИД-регулятор	$k_p = \frac{0,6}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 5\tau;$ $T_d = 0,2\tau$	$k_p = \frac{1,1}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 2\tau;$ $T_d = 0,4\tau$	$k_p = \frac{1,4}{k_0 \tau / T_0^*};$ $T_n = 1,6\tau;$ $T_d = 0,5\tau$

В указанных таблицах параметры объектов и регуляторов имеют следующие размерности:

$$k_0 = \frac{\text{единица измерения выходной переменной объекта}}{\% \text{ хода регулирующего органа}};$$

$$k_p = \frac{\% \text{ хода регулирующего органа}}{\text{единица измерения выходной переменной объекта}};$$

$T_0$  и  $\tau$  измеряются в секундах, условная постоянная времени астатического объекта

$$T_0^* = \frac{\text{секунда} \times (\% \text{ хода регулирующего органа})}{\text{единица выходной переменной объекта}},$$

Время удвоения интегральной части регулятора  $T_{И}$  и время предварения дифференциальной части регулятора  $T_{Д}$  измеряются в секундах.

Рассчитанные по приведенным формулам значения параметров настройки регулятора вследствие упрощений при определении параметров объектов могут отличаться от значений, обеспечивающих требуемое качество регулирования. В процессе наладки и эксплуатации АСР с типовыми регуляторами параметры настройки уточняются экспериментально.

Качество регулирования в одноконтурной АСР для стационарных объектов с типовыми регуляторами характеризуется временными и амплитудно-частотными характеристиками (рис. 5). Переходные процессы объекта и АСР совпадают на начальном участке на интервале около  $2\tau$  (рис. 5, а). Это объясняется тем, что эффект воздействия регулятора начинает сказываться на выходе объекта с запаздыванием  $\tau$ . Соответственно эффективность регулирования на высоких частотах также близка к нулю (рис. 5, б).

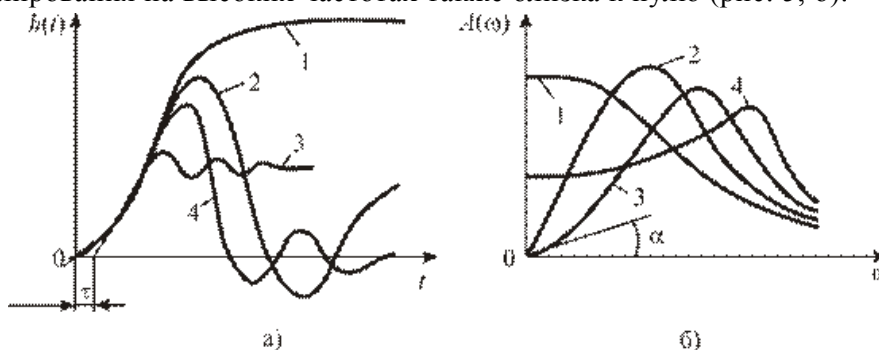


Рис. 5. Качество регулирования в одноконтурных АСР для стационарных объектов с типовыми регуляторами: а — по временным характеристикам; б — по амплитудно-частотным характеристикам; 1 — без регулятора; 2 — с И-регулятором; 3 — с П-регулятором; 4 — с ПИ-регулятором;  $\operatorname{tg} \alpha = T_{И}/k_p$ .

Высокая эффективность регулирования достигается на низких частотах, и в частности для АСР с ПИ-регулятором эффективность пропорционально соотношению параметров  $T_{И}/k_p$  так как при  $\omega \rightarrow 0$   $A(\omega) \approx (T_{И}/k_p)\omega$

Для нестационарных объектов с изменяющимися динамическими свойствами выбор параметров настройки регуляторов такой же, однако для улучшения качества регулирования целесообразно вводить устройства автоподстройки параметров регулятора при изменении динамических характеристик объекта.

### 3. Проектирование исполнительных механизмов

#### 3.1. Принципы управления исполнительными системами

Для выполнения машинного технологического цикла (процесса) требуется согласование работы всех механизмов и выходных устройств, включая исполнительные, контролирующие и управляющие. Естественно, что в основе управления машинами лежат принципы механики, увязывающие их силовые, энергетические и массовые характеристики.

В общем представлении системы автоматического управления (САУ) движением в современных машинах могут быть построены с использованием следующих принципов:

- 1) управление по разомкнутому циклу;
- 2) управление по замкнутому циклу;
- 3) комбинированное управление.

Автоматическое управление с разомкнутой цепью воздействий характеризуется функциями управления, которые не зависят от действительного хода (протекания) технологического процесса и выполняются по разомкнутому циклу для получения определенного конечного результата (рис. 6.).

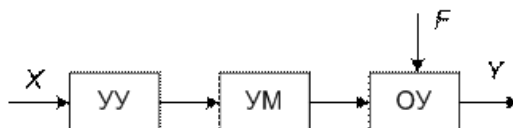


Рис. 6. Управление по разомкнутому циклу (жесткое управление)



Управление ( $X$ ) от оператора через управляющее устройство (УУ), усилитель мощности (УМ) воздействует на объект управления (ОУ).  $F$  — возмущающее воздействие, возникающее в результате взаимодействия САУ с внешней средой и вызывающее непланируемые изменения выходных координат.  $Y$  — предписанное значение выходной координаты, определяемое требуемым режимом работы.

К автоматическому управлению с разомкнутой цепью воздействий также относится САУ по возмущению (рис. 7)

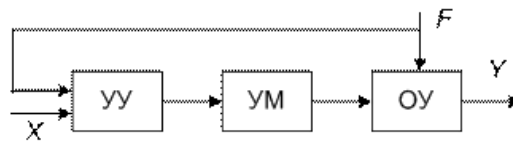


Рис. 7. Управление по возмущению

Сигнал датчика, измеряющего возмущение  $F$ , преобразуется в регулирующее воздействие на объекте управления ОУ. Поскольку природа возмущений  $F$  может быть различная, то регулирование по такой схеме затруднено и осуществляется только по основным возмущениям.

Управление по замкнутому циклу (рис. 8) характеризуется тем, что значение требуемых показателей какого-либо процесса поддерживается за счет подачи на управляющее устройство УУ сигналов с учетом фактического протекания процесса путем введения обратных связей.

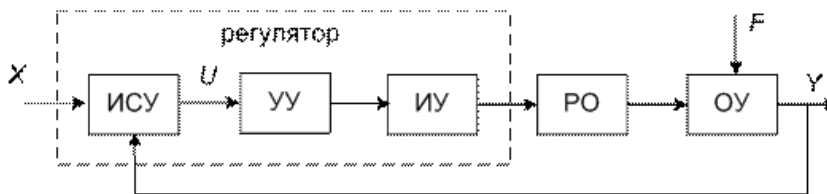


Рис. 8. Управление по замкнутому циклу

Замкнутая система включает ОУ (машину, агрегат), регулирующий орган (РО), непосредственно осуществляющий изменение регулируемой величины в ОУ. Регулятор включает: измерительно-сравнивающее устройство ИСУ, измеряющее текущее значение регулируемой величины  $Y$  и вырабатывающее сигнал рассогласования  $U = X - Y$ ; управляющее устройство УУ, усиливающее и преобразующее по необходимому закону сигнал  $U$ ; исполнительное устройство ИУ, выдающее (осуществляющее) регулирующее воздействие на регулирующий орган РО.

Рассмотренная схема управления действует по принципу отклонения, в которой влияние возмущения ослабляется, но не устраняется.

В современных машинах широко используются системы программного управления, формирующие входные сигналы для программного движения машины.

При динамическом анализе и синтезе машин следует учитывать и свойства систем управления движением, образующих с выходными звеньями двигателя и механизмом машины единую систему. С точки зрения конструктивного исполнения могут выполняться с последовательным соединением передаточного и исполнительного механизмов, параллельным соединением нескольких исполнительных механизмов (ИМ).

С учетом изложенного представить функциональную схему системы с управлением на входе исполнительного двигателя ИД можно в виде, как показано на рис. 9. Программный сигнал  $X$  подается на суммирующий узел  $A$ , где формируется сигнал управления  $U$ , определяемый как  $U = X - DU$ .

Значение выходной координаты  $Y$  (или ее производной по времени) сравнивается с ее программным значением  $Y_n$  (или). Сигнал ошибки  $y = Y - Y_n$  подается на вход отрицательной обратной связи, которая преобразует его в сигнал  $-DU$ . В зависимости от характера задания программного закона движения  $Y_n(t)$  различают системы стабилизации скорости ( $\dot{Y}(t) = \text{const}$ ), системы контурного управления, когда  $Y_n(t)$  — заданная функция времени, и системы позиционирования ( $Y_n(t) = \text{const}$ ).

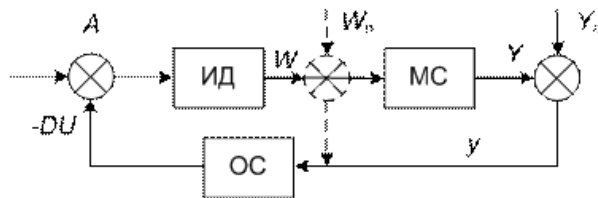


Рис. 9. Управление на входе исполнительного двигателя

Обратная связь может охватывать (пунктиром) только исполнительный двигатель ИД, тогда сигнал  $DU = W - W_{\Pi}$  пропорционален разности фактической  $W$  и программно заданной скорости  $W_{\Pi}$  вращения вала двигателя. В приведенной схеме управления решается задача стабилизации скорости, т.е. поддержание скорости в условиях меняющихся нагрузок. Контурное управление осуществляется с помощью следящих систем, обрабатывающих задаваемое программное движение  $Y_n(t)$  путем сравнения с ним реального движения.

На рис. 10. приведена функциональная схема следящей системы, построенная по принципу комбинированного управления. Здесь регулируемая величина  $Y$  управляемого объекта ОУ изменяется по заданному на входе системы закону  $X(t)$  под влиянием управляющего воздействия  $U$ .

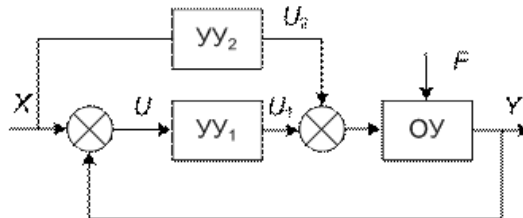


Рис. 10. Функциональная схема следящей системы с комбинированным управлением

В этой схеме, кроме устройства управления  $УУ_1$ , имеет место дополнительное управляющее устройство  $УУ_2$ , через которое вводится непосредственно на управляемый объект ОУ воздействие функции  $X(t)$ , заданной на входе системы. Таким образом, управляющее воздействие складывается из двух составляющих:  $U_1$ , зависящей от рассогласования  $DU = X - Y$ , и  $U_2$ , определяемой изменением заданного закона сигнала  $X$ . Устройство управления  $УУ_2$  предназначено для улучшения качества системы, построенной по принципу отклонения, и является дополнительной связью в системе.

В системах позиционирования (см. рис. 8) выходное звено исполнительного двигателя ИД или рабочий орган ОУ (МС) выводится в заданное положение с выполнением дополнительного требования по обеспечению быстродействия и точности при подходе к точке позиционирования. В настоящее время широкое распространение для позиционного и контурного управлений движением получили исполнительные устройства (ИУ) с замкнутым по положению (следящим) приводом. В зависимости от установки датчика положения (ДП) различают полузамкнутые и замкнутые исполнительные устройства (ИУ). В полузамкнутых ИУ датчик положения устанавливается на валу двигателя, в замкнутом — на исполнительном механизме. Для повышения качества управления зачастую проводится дополнительная обработка сигналов в цепях управления как адаптация, оптимизация и фильтрация. Однако при всех видах преобразования сигналов в цепях управления действительное изменение характеристик движения машины, отдельных узлов может быть осуществлено за счет приложения к ним механических воздействий, соизмеримых с действующими возмущениями. Для компенсации возмущающих сил необходимо прикладывать управляющие воздействия максимально близко к точкам возмущения, минуя главный привод. При этом главный привод получает лишь сигналы программного управления, а управляющие воздействия цепи обратной связи прикладываются с помощью дополнительных устройств, действующих на исполнительные звенья, подвергающиеся возмущениям. Такое техническое решение придает системе управления функции активной разгружающей системы. На указанном принципе построены системы с силовым, кинематическим управлением. В системе с силовым управлением обратная связь по сигналу ошибки (рис. 11) формирует обобщенную силу  $U$

(управление), прикладываемую непосредственно к механической системе. Действие силы  $U$  должно приводить к уменьшению ошибки  $y$ .

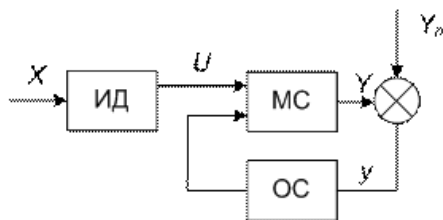


Рис. 11. Функциональная схема системы с силовым управлением

Математически линейная система с силовым управлением описывается выражением вида

$$U(p) = W_U(p) \cdot y, \quad (8)$$

где  $W_U(p)$  – передаточная функция обратной связи.

Системы с силовым управлением подразделяются на пассивные и активные. В пассивных системах для формирования управления применяют механические элементы: инерционные, упругие или диссипативные. Простейшими примерами пассивной системы с силовым управлением являются системы с маховиком, установленным на одном из вращающихся валов машины, динамическим гасителем колебаний или демпфером. На рис. 12. приведена функциональная схема системы с кинематическим управлением.

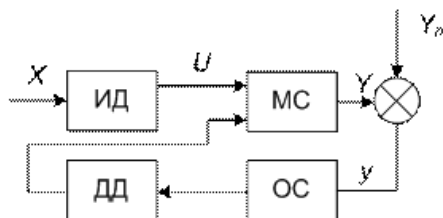


Рис. 12. Функциональная схема системы с кинематическим управлением

При кинематическом управлении автоматизированная система МС обладает дополнительной степенью подвижности. Здесь изменение координаты  $q^*$  осуществляется дополнительным двигателем ДД по сигналу ошибки, преобразуемому обратной связью. Сложение дополнительного перемещения с основным осуществляется дифференциальными механизмами. Такое взаимодействие приводит к компенсации ошибки и применяется при точном позиционировании механизмов, машин. Для обеспечения малых дополнительных перемещений МС используют пьезо- или магнитоstrictionные преобразователи, вибродвигатели, шаговые двигатели.

В соответствии с приведенными принципами управления находят применение отечественные и зарубежные разработки электроприводов (ЭП) МС, различающиеся:

- по роду тока — ЭП постоянного тока с ЭД постоянного тока и ЭП переменного тока с ЭД переменного тока;
- по виду УПУ — тиристорный с преобразователем на тиристорах, работающий по схеме «управляемый выпрямитель-двигатель (УВ-Д)»; транзисторный с преобразовательным устройством в виде двухтактного усилителя мощности (по схеме ШИП-Д);
- по типу передаточного устройства — редукторный, безредукторный; электрогидравлический с гидравлическим передаточным устройством; электромагнитный — с применением фрикционных или ферропорошковых муфт, выполняющих роль передаточного механизма;
- по характеру изменения важнейших параметров — нерегулируемый ЭП, параметры которого изменяются от внешних возмущений, и регулируемый ЭП, параметры которого изменяются и поддерживаются под действием управляющего устройства;
- по роду задачи регулирования различают:
  - а) ЭП со стабилизированным параметром, когда выходная координата поддерживается на заданном уровне с необходимой точностью;

б) ЭП программно-управляемый служит для изменения того или иного параметра по заранее заданной программе;

в) ЭП следящий (СП) обрабатывает изменение выходного параметра в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

- по виду управляющего сигнала ЭП разделяют на электроприводы с непрерывным управлением и ЭП с дискретным управлением. Применение указанных методов управления можно формировать непрерывное или прерывистое движение выходного вала ИД. По указанному признаку различают ЭП непрерывного и дискретного действия;

- по структуре электроприводы подразделяются на разомкнутые, не имеющие ОС, замкнутые и комбинированные.

### 3.2. Постановка задачи синтеза системы управления

В настоящее время существует несколько постановок задач проектирования (синтеза) электромеханических моделей автоматизированных систем, заключающихся в выборе структурной схемы, параметров, способа технической реализации разработанного модуля из условия выполнения ряда требований к проектируемой автоматизированной системе и обеспечению ее характеристик. Одним из способов описания требований к проектируемому ЭММ может служить задание показателей качества работы ЭММ как допустимое значение статической, динамической и средней квадратической ошибок. При этом должны быть известны характеристики управляющих и возмущающих воздействий. Детерминированные воздействия должны быть заданы как функции времени или их производные. Случайные сигналы и помехи должны быть определены их корреляционными функциями или спектральными плотностями.

Если управляющий сигнал описывается медленно меняющейся функцией времени, а сигнал возмущения отсутствует, то используют первый способ проектирования САУ ЭММ, выполняя задачу синтеза в следующем порядке:

- 1) для объекта управления (ОУ) по техническим условиям выбирают регулирующий орган с силовым приводом, усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) и датчики. Объединяя силовые устройства и устройства информационного канала линиями связи, формируют неизменяемую часть ЭММ;

- 2) по статическим и динамическим характеристикам выбранных устройств составляют передаточные функции отдельных элементов, формируют структурную схему, определяют места включения корректирующих устройств (последовательное, параллельное и последовательно-параллельное);

- 3) по заданным требованиям на запас устойчивости по фазе, амплитуде соответственно показателям качества и точности строят желаемые логарифмические амплитудные (ЛАЧХ<sub>Ж</sub>) и фазовые частотные характеристики (ЛФЧХ) разомкнутой системы ЭММ;

- 4) по построенным желаемым (ЛАЧХ<sub>Ж</sub>) и логарифмическим характеристикам неизменяемой (нескорректированной) части (ЛАЧХ<sub>НС</sub>) определяют коэффициент усиления дополнительно вводимых промежуточных усилителей, а также тип и параметры корректирующих устройств.

Второй способ используют, когда на синтезируемую систему действует возмущение, описываемое в форме прямого преобразования Лапласа. В этом случае задачу синтеза выполняют для наиболее полного подавления возмущения при минимальном значении ошибки в системе.

Третий способ применяют, когда в системе действуют управляющий и возмущающий сигналы одновременно. В этом случае синтезируемая система должна наиболее точно обрабатывать управляющий сигнал и подавлять влияние возмущения.

Если характеристики управляющих и возмущающих воздействий известны, то систему управления можно спроектировать как оптимальную, обеспечив минимальное значение суммарной среднеквадратической ошибки (при использовании теории оптимальных фильтров Н. Винера и Р. Калмана). Очевидно, что передаточная функция оптимальной системы зависит не только от характеристик сигнала и помехи, но и от

выбранного критерия оптимальности (оценки качества работы). При наиболее общей постановке задачи синтеза оптимальной системы решение находят с учетом достижения минимума функционала (критерия качества):

$$J = \int_0^T [U_e(t) + U_u(t)] dt \quad (10)$$

где  $U_e(t) = e^2(t) + a_1 e^2(t) + \dots + a_k (e^k(t))^2$  — квадратичная форма относительной ошибки системы  $e(t)$ ;  $U_u(t) = U^2(t) + q_1 U_2(t) + \dots + q_k (U^k(t))^2$  — квадратичная форма относительно сигнала управления  $U(t)$ ;  $T$  — время функционирования системы;  $a_i$  и  $q_i$  — коэффициенты квадратичных форм функционала (10).

Первая квадратичная форма функционала (10) выбирается из требований, предъявляемых к точности синтезируемой системы, вторая учитывает ограничения на сигнал управления. Задача оптимального синтеза для рассматриваемого случая может быть сформулирована следующим образом. Из множества  $U(t)$  следует выбрать и технически реализовать такой сигнал управления, который переведет ОУ из начального состояния в конечное и минимизирует функционал (10). Для решения таких задач применяют различные подходы: методы вариационного исчисления, принцип максимума Л.С. Понтрягина, метод динамического программирования Р. Белмана. Однако синтез оптимальных систем из условия минимума функционала (10) достаточно трудно выполним, поскольку отсутствуют аналитические методы определения связи коэффициентов квадратичных форм  $a_i$  и  $q_i$  с заданными показателями качества работы синтезируемой системы ЭММ. Значительный перебор вариантов оптимальных систем с различными видами квадратичных форм и их коэффициентов ведет к увеличению объема вычислений и росту машинного времени при проектировании электромеханической системы. Важным фактором также является реализация найденных алгоритмов управления из-за их сложности и приближенного воспроизведения.

В настоящее время наибольшее распространение при синтезе систем управления электромеханической системы находит динамический синтез, выполняемый из условия обеспечения допустимых ошибок в проектируемой системе и удовлетворения других показателей качества работы системы. При проектировании электромеханической системы всегда нужно стремиться к простоте схемотехнического решения, так как помимо требования к качеству функционирования в процессе синтеза модуля предъявляются требования и к его сложности. В качестве функционала сложности проектируемого модуля часто используют следующий интеграл

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^{2\gamma} [W_p(j\omega)]^2 d\omega$$

где  $W_p(j\omega)$  — частотная характеристика разомкнутой системы;  $\gamma$  — порядок астатизма.

Кроме требований к качеству работы проектируемого электромеханического модуля могут предъявляться и другие требования: по надежности, стабильности характеристик и массогабаритным показателям.

### 3.3. Синтез электромеханического модуля методом амплитудно-частотных характеристик

На этапе статического расчета ЭММ определяется передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p^g \cdot A(p)} = \frac{K_p}{p^g (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots (T_i p + 1)} \quad (11)$$

где  $K_p$  - коэффициент усиления разомкнутой системы ЭММ;  $g = 0, 1, 2, \dots$  — порядок астатизма электропривода, определяемый числом интегрирующих звеньев, и для ЭП астатических первого порядка  $g = 1$ ;  $g = 2$  — для приводов астатических второго порядка;  $i$  — произвольное натуральное число условно перенумерованных постоянных времени типовых звеньев системы следящего ЭП, располагаемых в (11) в порядке убывания, т.е.  $T_1 > T_2 > \dots T_i$ .

Коэффициент усиления разомкнутой системы следящего электропривода (СЭП):

$$K_p = \prod_{i=1, j=1}^{n, k} K_i \cdot K_j, \quad (12)$$

где  $\prod$  — знак произведения;  $K_i, K_j$  — коэффициенты передачи звеньев структурной схемы, определяемые статическими характеристиками элементов АСУ.

Известно, что целью статического расчета системы при синтезе является определение коэффициентов усиления элементов системы, обеспечивающих требуемую точность поддержания критерия управления. В зависимости от требований механизмов работа электроприводов может протекать либо преимущественно в переходных режимах пуска, реверса, торможения, либо в режимах поддержания заданной скорости двигателя. Выбор вида и параметров ОС для названных режимов производится по-разному. Поэтому для обеспечения заданной точности СЭП необходимый коэффициент усиления разомкнутого привода ( $K_{н.р.}$ ) рассчитывают по выражениям при заданных:

- скоростной погрешности  $K_{н.р.} = \frac{\Omega_0}{\delta_{ск}}$ ;
- моментной погрешности  $K_{н.р.} = \frac{M_n}{(\delta_m k_2 i^2)}$ ;
- погрешности по ускорению  $K_{н.р.} = \frac{\epsilon_0}{\delta_{ус}}$ .

где  $k_2$  — коэффициент жесткости (демпфирования) механической характеристики.

В настоящее время для анализа и синтеза электроприводных систем общего применения широко используют метод логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ). К основным достоинствам метода можно отнести: возможность экспериментального определения ЛАФЧХ реальных объектов в процессе выполнения исследований СУ и производства наладочных работ СЭП и последующего синтеза систем управления электроприводами с наперед заданными техническими характеристиками. При анализе устойчивости нескорректированной системы по ЛАФЧХ разомкнутой системы определяют две частоты:  $\omega_c$  — частоту среза [ $L(\omega_c) = 0$ ] и частоту  $\omega_{п}$  [ $g(\omega_{п}) = -p$ ].

Для построения ЛАФЧХ исходного ЭП используют выражение (11) передаточной функции разомкнутой системы с заменой  $p = j\omega$ , что позволяет получить уравнение для частотной характеристики. Обычно для определения устойчивости замкнутой системы используют приближенную ЛАЧХ, представляющую собой асимптотическую ЛАЧХ разомкнутой системы, имеющую точки излома в сопрягающих частотах, определяемых постоянными временными  $T_i$  звеньев.

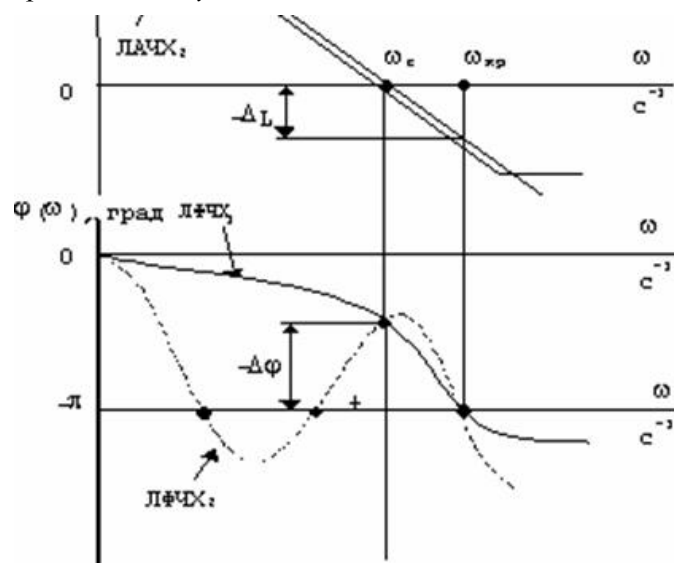


Рис. 13. Оценка устойчивости по ЛЧХ

Точка пересечения ЛАЧХ<sub>1</sub> с осью абсцисс при модуле амплитудно-фазовой характеристики равным единице определяет частоту среза  $\omega_c$  (рис. 13). Другой критической точкой является точка пересечения ЛФЧХ<sub>1</sub> с линией фазового сдвига равного  $-p$ , что соответствует  $\omega_{кр}$ . Известно, что оценку устойчивости САУ(САР) определяют по запасу устойчивости по амплитуде ( $-DL$ ) и запасу устойчивости по фазе ( $-Dj$ ). Для удовлетворительного качества регулирования ЭП должны выполняться следующие условия:  $DL^3(10-15)$  Дб;  $Dj^3(30-60)$  град. Если разомкнутая система устойчива (ЛАЧХ<sub>2</sub>), а ЛФЧХ<sub>2</sub> пересекает линию  $-p$  в нескольких точках, то замкнутая система будет устойчивой, когда  $L(\omega) < 0$  при  $j = -p$ , для самой правой из точек пересечения. Если при анализе окажется, что  $\omega_c = \omega_{кр}$ , то рассматриваемая система находится на границе устойчивости.

### 3.4. Статический расчет ЭММ

Структурная схема ЭММ с суммирующим усилителем при условном действии всех обратных связей приведена на рис. 14. Электромеханическая характеристика стабилизации скорости для рассматриваемой схемы рассчитывается по уравнению, записанному условно при действии всех обратных связей в виде:

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega = \frac{U_3 k_y k_n k_m}{1 + (k_c k_n + k_s + k_n) k_y k_n} - \frac{I R_y k_n (1 + k_n R_n - k_m) \frac{k_y k_n}{R_y}}{1 + (k_c k_n + k_s + k_n) k_y k_n} \quad (14)$$

где  $U_3$  – напряжение сигнала задания скорости;  $k_y, k_n, k_m$  – коэффициенты передачи усилителя, преобразователя и двигателя;  $k_c, k_s, k_n, k_m$  – коэффициенты передачи датчиков скорости, ЭДС, напряжения и тока двигателя;  $R_y, R_n$  – сопротивление цепи «преобразователь – двигатель» и цепи якоря двигателя;  $E_n, E_d$  – ЭДС преобразователя и двигателя.

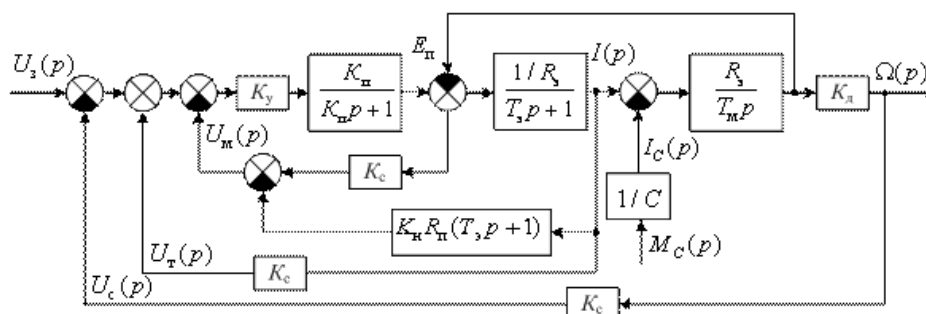


Рис. 14. Структурная схема ЭММ с суммирующим усилителем

Из уравнения (14) электромеханической характеристики общего вида можно получить уравнение при действии конкретной обратной связи, приняв равным нулю коэффициенты других связей.

Выбор обратной связи или комбинации некоторых следует производить на основе следующих принципов. Обратная связь по скорости является главной связью по регулируемой координате и обеспечивает наиболее высокую точность стабилизации скорости при наличии тахогенератора. Обратная связь по напряжению обеспечивает невысокую стабилизацию напряжения питания двигателя, компенсируя падение напряжения в силовой цепи преобразователя. Поэтому такая обратная связь может использоваться при малых диапазонах регулирования, определяемых допустимым статизмом электромеханической характеристики.

Положительная ОС по току способна обеспечить высокую точность стабилизации скорости, но расчетная точность находится в зависимости от нелинейной характеристики управления преобразователя.

Отрицательная ОС по ЭДС применяется при небольших диапазонах регулирования скорости и не обеспечивает ожидаемую точность регулирования.

Заданная погрешность системы электропривода определяет значение коэффициентов обратных связей, усилителя и преобразователя. В системе с отрицательной обратной связью по скорости произведение искомых коэффициентов усиления, передачи можно получить из уравнения:

$$k_c k_y k_{\pi} = \frac{1}{k_{\pi}} \left( \frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega} - 1 \right) = \frac{1}{k_{\pi}} \left( \frac{S_p}{S_3} D - 1 \right). \quad (15)$$

Для системы с отрицательной ОС по напряжению искомое произведение коэффициентов находят из выражения:

$$k_{\pi} k_y k_{\pi} = \frac{\Delta\Omega_p - \Delta\Omega_3}{\Delta\Omega_3 - \Delta\Omega_e} = \frac{\frac{S_p}{S_3} D - 1}{1 - \frac{S_e}{S_3} D}, \quad (16)$$

а с положительной обратной связью по току так:

$$k_{\pi} k_y k_{\pi} = R(\Delta\Omega_p - \Delta\Omega_3) = R \left( 1 - \frac{S_3}{S_p} \cdot \frac{1}{D} \right), \quad (17)$$

где  $\Delta\Omega_p = IR_3 k_D$  — погрешность в разомкнутой системе;  $\Delta\Omega_3$  — заданная погрешность в замкнутой системе;  $\Delta\Omega_e = IR_я k_D$  — погрешность естественной характеристики двигателя;  $S_3$  — заданный статизм замкнутой системы;  $S_p$  — статизм разомкнутой системы;  $S_e$  — статизм естественной характеристики;  $D$  — расчетный диапазон регулирования скорости.

Стабилизация момента ДПТ осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по току, обеспечивающей резкое снижение скорости двигателя при приблизительно постоянном моменте. Связь используется с отсечкой (рис. 15), исключающей действие связи за счет характеристик стабилитронов VD1, VD2 при низких нагрузках. Введение связей по току обусловлено необходимостью защиты двигателя от недопустимых перегрузок в статических и динамических режимах.

В режиме стабилизации момента отрицательные обратные связи по току, скорости и напряжению, осуществляющие стабилизацию скорости, действуют совместно. Связь по току снижает скорость и ЭДС преобразователя, а связь по скорости их повышает. Поэтому связь по скорости целесообразно отключить при стабилизации момента за счет отсечки. Отсечка реализуется обычно за счет ограничения выходного напряжения промежуточного усилителя, задающего напряжение для контура стабилизации момента.

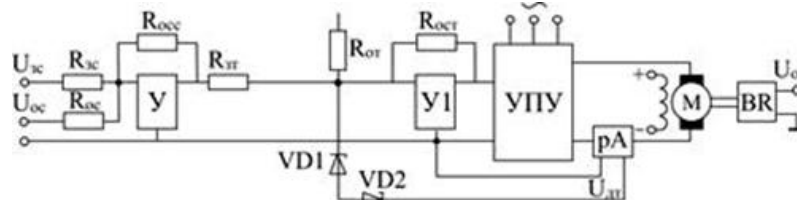


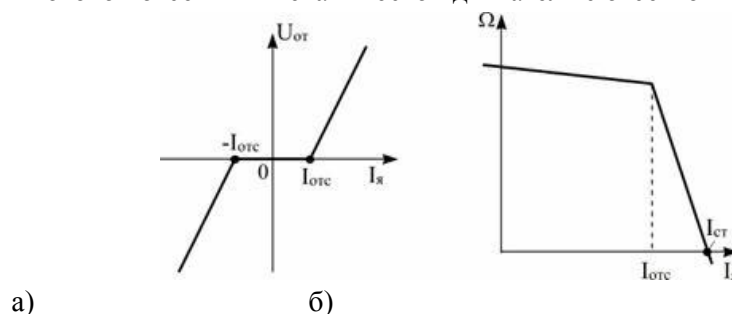
Рис. 15. Функциональная схема с отсечкой по току

Задержка включения отрицательной ОС по току формируется за счет срабатывания стабилитронов VD1, VD2 на входе усилителя Y1. Напряжение токов связи  $U_{об}$  на входе усилителя определяется различно для различных участков изменения тока

$$U_{об} = U_{дт} - U_{от} = k_{дт} I_{я} - U_{от} = k_{рт} (I_{я} - I_{отс}) \quad (18)$$

где  $k_{дт}$  - передаточный коэффициент датчика тока,  $U_{от}$  - напряжение отсечки по току, равное напряжению стабилитронов VD1, VD2;  $I_{отс} = U_{от} / k_{дт}$  - ток отсечки.

Характеристики токовой отсечки и механической двигателя с отсечкой по току приведены на рис. 16.



а)

б)



Рис. 16. Формирование токовой отсечки (а) и механической характеристики двигателя с токовой отсечкой (б)

Для определения коэффициентов усиления по замкнутому контуру тока и обратной связи при токах отсечки  $I_{отс}$  и стопорения  $I_{ст}$  значение тока стопорения  $I_{ст}$  следует принять при  $W = 0$ . В режиме стопорения для рассматриваемой системы можно записать, что при  $W = 0$ ,  $I_{я} = I_{ст}$  и  $E_{ст} = I_{ст}R_{э} = k_{п}k_{у}[U_{зт} - k_{дт}(I_{ст} - I_{отс})]$ , где  $E_{ст}$  — ЭДС преобразователя в режиме стопорения. При анализе полученного выражения коэффициент

усиления по замкнутому контуру тока составит:  $k_{т} = k_{у}k_{п} \cdot \frac{k_{дт}}{R_{э}} = \frac{I_{зт} - I_{ст}}{I_{ст} - I_{отс}}$ , где  $I_{зт} = k_{у}k_{п} \frac{U_{зт}}{R_{э}}$  — расчетный ток короткого замыкания.

При расчете параметров элементов отрицательной ОС по току коэффициенты усиления усилителя У1 по задающему воздействию выбираются произвольно.

#### 4. Ход работы курсового проекта на примере АСР уровня раствора в баке

**Задание.** Подобрать типовой регулятор для АСР уровня раствора в баке. Условия эксплуатации регулятора и других устройств АСР задаются дополнительно или не ограничиваются. Уровень должен поддерживаться со статической точностью  $\Delta H_{ст.зад} = \pm 0,12 \text{ м}$ . В переходных процессах, длительность которых должна быть не более  $t_{пер} \leq 45 \text{ с}$ , допускаются в первом выбросе отклонения уровня до  $\Delta H_{макс.зад} = 0,35 \text{ м}$ .

При работе без регулятора наблюдаются плавные и скачкообразные отклонения уровня от заданного значения. Для определения параметров объекта была экспериментально снята кривая разгона (табл. 4), возникающая при перестановке регулирующего органа на  $M = 25\%$ .

Таблица 4.  
Данные экспериментальной кривой разгона

$H, \text{ м}$	6,00	6,03	6,05	6,12	6,18	6,24	6,30	6,45
$t, \text{ с}$	0	5	10	15	20	25	30	40
$H, \text{ м}$	6,60	6,75	6,84	6,96	7,05	7,11	7,46	7,50
$t, \text{ с}$	50	60	70	80	90	100	200	500

Выполнить следующие задания:

1. Построить (если от руки, то на миллиметровке) кривую разгона 1 (рис. 1), заданную табл. 1. Определить параметры эквивалентного объекта, который описывается, уравнением первого (второго) порядка с запаздыванием. Найти параметры объекта  $k_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$ .

2. Построить эквивалентную кривую разгона 2 на том же графике, что и кривая 1, произвести оценку аппроксимации.

3. Выбрать тип (закон) регулятора и определить параметры его настройки.

4. Проверить правильность выбора регулятора и параметров его настройки путем построения графика переходного процесса в системе с заданным объектом и выбранным регулятором. Расчеты выполнить с применением компьютера.

Дать подробный анализ полученных результатов, сравнить их с заданием.

5. Выбрать типовой промышленный регулятор и привести его основные характеристики, составить функциональную (структурную) схему АСР, кратко описать принцип действия системы.

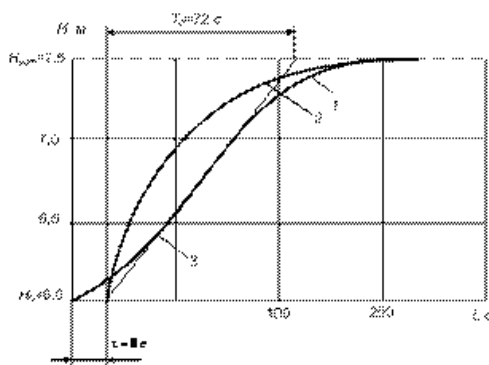


Рис. 17. Временные характеристики гидравлического объекта управления по уровню: 1 — экспериментальная кривая; 2 — эквивалентная кривая; 3 — точка перегиба.

### 1. Определение параметров объекта управления.

По кривой 1 (рис. 17) определяем постоянную времени эквивалентного объекта  $T_0 = 72$  с и время запаздывания  $\tau = 8$  с, для чего проводим касательную с кривой переходного процесса в точке перегиба.

Эквивалентная кривая разгона представляет собой экспоненту с запаздыванием  $\tau$ . По формуле  $H = H_{уст.} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \right]$  определяем координаты экспоненты по времени (табл. 5).

Таблица 5  
Данные эквивалентной кривой разгона

$H, \text{ м}$ $t, \text{ с}$	6,00 0	6,18 5	6,36 10	6,50 15	6,63 20	6,72 25	6,82 30	6,99 40
$H, \text{ м}$ $t, \text{ с}$	7,05 50	7,11 60	7,31 70	7,37 80	7,39 90	7,42 100	7,46 200	7,50 500

Строим на том же графике (рис. 17) эквивалентную кривую 2 со сдвигом по оси абсцисс вправо на величину запаздывания  $\tau = 8$  с.

Для оценки точности приближения экспериментальных данных к решению уравнения эквивалентного объекта, полученного в результате идентификации, применяют различные критерии. Наиболее распространенным критерием является среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от характеристики, полученной в результате расчетов:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [H_1(t_i) - H_2(t_i)]^2},$$

где  $H_1(t_i)$  — экспериментальное значение уровня в момент времени  $t_i$ ;  $H_2(t_i)$  — расчетное (эквивалентное) значение уровня в момент времени  $t_i$ ;  $n$  — число экспериментальных точек.

Таким образом, в дальнейших расчетах используем эквивалентный объект, описываемый (по динамическим характеристикам) с точностью 10... 15% дифференциальным уравнением 1-го порядка с самовывравниванием и с запаздыванием передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{T_0 p + 1}$$

Величина коэффициента усиления объекта

$$k_0 = \frac{H_{уст.} - H_0}{M} = \frac{7,5 - 6,0}{25} = 0,06 \frac{\text{м}}{\% \text{ хода регулирующего органа}}$$

Безразмерные показатели объекта и переходного процесса:

$$t / T_0 = 8 / 72 = 0,11; \quad t_{пер} / t = 45 / 8 = 5,8.$$

Другие способы параметризации моделей второго порядка по кривой разгона даны в приложении.

### 2. Выбор типового регулятора АСР и определение параметров его настройки.

Требуемое качество регулирования в процессе эксплуатации АСР, кроме безусловного требования устойчивости, определяется следующими критериями: минимальное время регулирования, отсутствие пере-регулирувания, минимальная интегральная квадратичная ошибка и др.

Выбор того или иного критерия оптимальности определяется технологическими требованиями к системе регулирования и является одной из первых задач по выбору типового регулятора. С экономической и в ряде случаев с технологической точки зрения наиболее целесообразно применять в качестве критерия оптимальности минимальную интегральную квадратичную оценку, так как реализация такого критерия почти всегда приводит к минимальным потерям при регулировании и к минимальным динамическим ошибкам. Однако если параметры системы недостаточно точно известны или если они изменяются, то наличие в систе-

ме, настроенной по данному критерию, продолжительных колебаний может привести к неустойчивой работе регулятора или резонансным явлениям.

Наибольшим запасом по устойчивости обладают системы, настроенные по критериям с минимальным временем регулирования и без перерегулирования. Когда требуется исключить влияние регулирующего воздействия данной системы на другие величины сложного объекта, целесообразно, чтобы переходный процесс имел аperiodический характер.

Вторым этапом по выбору регулятора является определение типа (закона) регулятора. Существуют различные таблицы, графики, номограммы по выбору регулятора, зависящие от динамических свойств объекта, относительной нагрузки, характера ее изменения, заданных показателей качества регулирования.

В нашем примере (АСР уровня гидравлической системы) подходящим является ПИ-регулятор, так как по условиям задачи на объект действуют значительные возмущения, вызывающие отклонения уровня, соответствующие 20%-ной перестановке регулирующего органа. Если при дальнейших расчетах окажется, что ПИ-регулятор не удовлетворяет заданным условиям, нам необходимо выбрать более сложный (и следовательно, более дорогой) ПИД-регулятор, который имеет лучшие показатели регулирования.

За критерий оптимальности регулирования для нашего случая (АСР уровня) примем переходный процесс с 20%-ным перерегулированием, обеспечивающий малое время регулирования переходного процесса (задано  $t_{\text{рег. зад}} = 45$  с) и имеющий динамическую ошибку меньшую, чем при критерии с минимальным временем регулирования, тем более что объект допускает 20%-ное перерегулирование. Для определения параметров настройки типовых регуляторов в АСР с объектом первого порядка с запаздыванием при различных критериях оптимальности можно воспользоваться табл. 2, 3.

На основании формул табл. 2 вычислим параметры ПИ-регулятора в АСР уровня с объектом первого порядка с самовыравниванием и с запаздыванием и переходным процессом с 20%-ным перерегулированием:

$$k_p = 0,7 \frac{k_0 T}{T_0} = \frac{0,7}{0,06 \cdot 0,11} = 106;$$

$$T_{\text{и}} = 0,7 T_0 = 0,7 \cdot 72 = 50 \text{ с.}$$

### 3. Анализ динамических характеристик АСР с типовым регулятором.

Анализ динамических характеристик в одноконтурных АСР с типовым регулятором можно провести, используя методику на компьютере. Эти алгоритмы расчета можно применять не только для нахождения переходных процессов в АСР технологическими процессами при выбранном типе регулятора и найденных параметрах его настройки, но и изменяя структуру алгоритма, а также числовые значения коэффициентов, определить наиболее целесообразный тип регулятора и его параметры.

В нашем случае (пример АСР уровня) расчет переходного процесса и АСР проведем на ЭВМ. Структурная динамическая схема (модель) системы представляет собой систему первого порядка с самовыравниванием и с запаздыванием с ПИ-регулятором, где  $k_0 = 0,06$ ;  $T_0 = 72$  с;  $k_p = 106$ ;  $T_{\text{и}} = 50$  с;  $M = 15\%$ .

В результате расчета построим характеристику переходного процесса по полученным значениям (рис. 18). Переходный процесс изображается в отклонениях от заданного значения уровня  $H_0 = 6,0$  м (принятого за «0» отсчета), время (в секундах) — реальное.

Из графика переходного процесса (рис. 18) видно, что:

- статическая ошибка  $\Delta H_{\text{ст}} = 0$  (характерно для астатических систем) т.е. меньше  $\Delta H_{\text{ст. зад}} = 0,12$  м;
- максимальное отклонение регулируемой величины (динамическая ошибка)  $\Delta H_{\text{макс}} = 0,24$  м меньше  $\Delta H_{\text{макс. зад}} = 0,35$  м;
- время регулирования  $t_{\text{рег}} = 28$  с меньше заданного значения равного 45 с (по истечении  $t_{\text{рег}}$  значение  $\Delta H \leq 0,05 \Delta H_{\text{макс}}$ ).

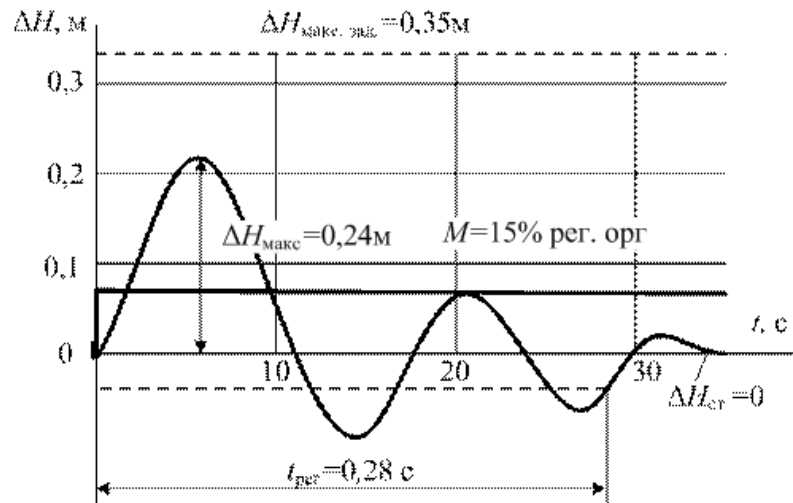


Рис. 18. Характеристика переходного процесса в АСР уровня гидравлического объекта, полученная расчетом на ЭВМ

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что регулятор и его параметры выбраны правильно и это обеспечивает требуемое качество регулирования.

В случае если полученные показатели качества регулирования не удовлетворяют заданным условиям, то проводится проверка предыдущих расчетов и анализов. Если ошибки не определены, то следует изменить параметры настройки регулятора последовательно на 5...15% и просчитать в каждом случае снова переходный процесс. В случае улучшения качества регулирования при измененных параметрах регулятора методом приближений найти необходимые параметры регулятора.

В некоторых случаях необходимо заменить регулятор на более совершенный или ввести в цепь регулятора корректирующие элементы.

После расчетов динамических параметров АСР выбираем промышленный тип регулятора и отдельные его устройства (блоки), параметры которых удовлетворяют рекомендациям расчетов с 20...30%-ным запасом. Это необходимо в каждом случае уточненной настройки регуляторов на технологическом оборудовании, так как отдельные параметры объекта могут изменяться со временем.

#### 4. Построение переходных процессов в АСР.

Построение графика переходного процесса в АСР при выбранном типе регулятора и найденных параметрах его настройки проводится для проверки правильности произведенных расчетов. (Задача о выборе регулятора, о его параметрах, качестве регулирования может быть решена полностью на ЭВМ.)

Для построения переходных процессов в системе, структурная схема может быть получена путем исключения отдельных звеньев из структурной схемы, представленной на рис. 19

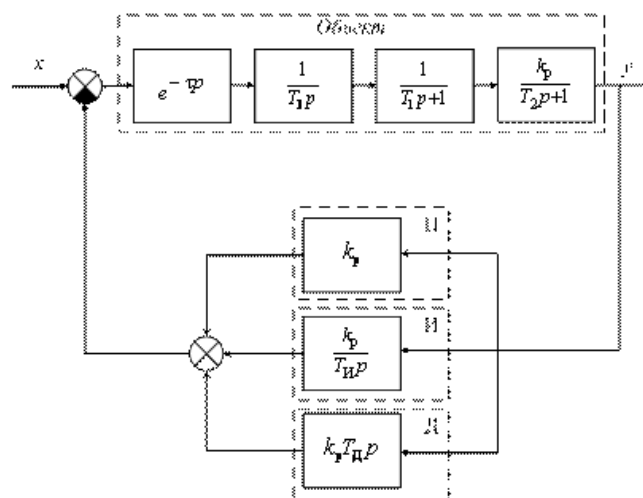


Рис. 19. Структурная схема автоматизированной системы для построения переходных характеристик

Если, например, исследуемая АСР содержит объект с самовыравниваем 1-го порядка с запаздыванием и ПИ-регулятор, то следует принять  $T_1 = 0$ ,  $T_3 = 0$ ,  $T_d = 0$ .

Для АСР с объектами, имеющими в своей структуре интегрирующее звено (объекты без самовыравнивания) необходимо принять  $T_3 = 1$  и  $K_0 = 1/T_0$ .

## Приложение 1 Варианты заданий

### Технологические параметры для курсового проектирования

Объект, параметр регулирования	Вариант	Возмущение М, %, хода регулирующего органа		Показатель качества регулирования в абсолютных значениях		
		плавное	скачкообразное	$\Delta_{уст}$	$\Delta_{макс}$	$t_{рег}, c$
Уровень $H, м$	1	10	10	0,05	0,15	85
	2	10	5	0,05	0,15	$0 < t < 3600$
	3	20	20	0,10	0,25	150
	4	20	10	0,10	0,25	80
	5	20	15	0,05	0,20	$0 < t < 3000$
Температура $\Theta, ^\circ C$	6	10	5	32	1	$0 < t < 3200$
	7	10	10	3	1	$0 < t < 3600$
	8	10	8	2	1	100
	9	5	3	1	0,5	30
	10	5	5	1	1	50
Скорость $v, м/мин$	11	25	10	10	24	150
	12	25	5	10	10	90
	13	10	10	5	10	$0 < t < 3000$
	14	10	5	10	10	150
	15	15	10	10	15	80
Подача (расход) $Q, л/с$	16	5	3	0,02	0,05	450
	17	5	5	0,02	0,10	300
	18	10	10	0,05	0,15	$0 < t < 3600$
	19	10	5	0,05	0,10	250
	20	8	5	0,02	0,10	$0 < t < 3000$
Влажность $m, \%$	21	10	8	0,5	1,0	150
	22	10	5	0,5	0,5	$0 < t < 3600$
	23	10	10	0,3	0,5	$0 < t < 3000$
	24	20	10	1,0	2,0	200
	25	20	5	0,5	1,0	150

### Данные экспериментальных кривых разгона технологических объектов управления

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

$H, м$	1,002	1,003	1,012	1,024	1,052	1,096	1,116	1,142	1,180	1,192	1,200	1,200
$\theta, ^\circ C$	80	80,1	80,1	80,2	80,3	80,8	81,1	81,5	83,0	84,0	87,9	90,0
$v, м/мин$	400	406	422	460	498	548	570	580	597	600	600	600
$Q, л/с$	2,00	2,02	2,03	2,07	2,17	2,38	2,52	2,72	3,16	3,42	3,92	4,00
$m, \%$	10,0	10,1	10,2	10,3	10,8	11,6	12,4	13,1	15,2	16,6	18,2	20,0
$t, с$	0	20	40	60	100	160	200	250	400	500	1000	3000

## Приложение 2

### Параметризация моделей второго порядка по переходной характеристике

#### Основные положения

Весьма распространенным в практике методом испытания объектов управления является скачкообразное изменение величины на входе (в режиме установившегося сигнала на выходе) и регистрация соответствующей реакции на выходе. Если пренебречь длительностью скачка и его величину принять за единицу, то изменение выходной величины по отношению к изменению величины на входе будет представлять переходную характеристику объекта.

При таком экспериментальном исследовании переходная характеристика часто наблюдается как аperiodический (монотонный) процесс с точкой перегиба или как колебательный монотонно затухающий процесс и в обоих случаях выходная величина явно стремится к новому постоянному значению. В таких случаях часто пытаются идентифицировать объект управления как объект 2-го порядка, вычисляя тем или иным способом коэффициенты дифференциального уравнения (или передаточной функции) по экспериментальной переходной характеристике.

#### Первый способ

Рассмотрим два способа вычисления коэффициентов передаточной функции при монотонной переходной функции с точкой перегиба.

Пусть переходная характеристика имеет вид, представленный на рис. П1.

Оба способа предполагают отыскание точки перегиба на экспериментальной кривой и проведение через нее касательной до пересечения с горизонтальной осью координат (ось времени) и с асимптотой, к которой стремится переходная функция.

Первый способ предполагает далее считывание с графика (см. рис. П1) интервалов  $T_a$  и  $T_b$ , второй способ -  $T_b$  и  $T_c$ .

Передаточная функция ищется в виде

$$W(p) = \frac{K}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}, \quad T_1 < T_2 \quad (1)$$

Будем считать, что статический коэффициент передачи  $K$  известен из статической характеристики объекта. Для определенности положим  $K = 1$  (см. рис. П1).

Таким образом, по двум интервалам, полученным по экспериментальным данным, необходимо найти две постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$ .

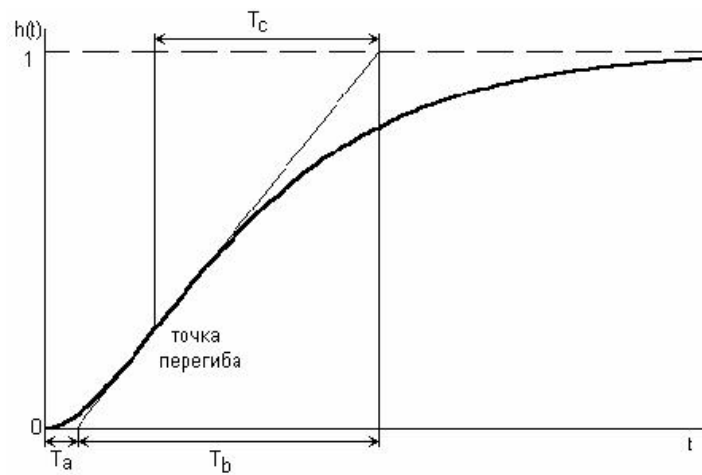


Рис. П1. Измеряемые отрезки на экспериментальной переходной функции

Для объекта с передаточной функцией (1) при  $K = 1$  переходная функция

$$h(t) = 1 + \frac{d}{1-d} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{1-d} e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (2)$$

где  $d = T_1/T_2$  и при принятом условии  $T_1 < T_2$  будем иметь  $0 < d < 1$ .

Используя выражение (2), можно получить

$$T_a = T_1 \left( \frac{\ln d}{d-1} + \frac{1+d}{d} - d^{-\frac{1}{1-d}} \right); \quad (3)$$

$$T_b = T_1 d^{-\frac{1}{1-d}}; \quad (4)$$

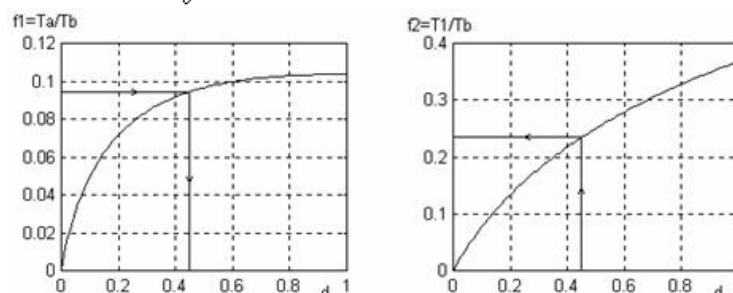
$$T_c = T_1 + T_2. \quad (5)$$

Для быстрой идентификации по первому способу (по  $T_a$  и  $T_b$ ) заготавливают обычно два графика на миллиметровке.

Тогда идентификация сводится к определению по величине отношения  $T_a/T_b$  величины  $d$  с помощью первого графика. Затем по найденной величине  $d$  по второму графику находят отношение  $T_1/T_b$ , после чего легко вычисляются  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. П2). Как видно из первого графика на рис. 2 отношение  $T_a/T_b$  должно быть меньше некоторого уровня, а именно, необходимо иметь  $T_a/T_b < 3/e - 1$ , иначе решение отсутствует и это может означать, что или отрезки  $T_a$  и  $T_b$  определены слишком грубо или переходная функция не является переходной функцией звена второго порядка.

$$\frac{T_a}{T_b} = f_1(d) = d^{\frac{1}{1-d}} \left( \frac{\ln d}{d-1} + \frac{1+d}{d} \right) - 1;$$

$$\frac{T_1}{T_b} = f_2(d) = d^{-\frac{1}{1-d}}.$$

Рис. П2. Графики для вычисления постоянных времени по отрезкам  $T_a$  и  $T_b$ 

При наличии ЭВМ можно использовать m-файл `ta_tb.m` (см. ниже) в пакете Matlab, который запрашивает значения  $T_a$  и  $T_b$  и после решения нелинейного уравнения выдает значения  $T_1$  и  $T_2$ .

```
clc % ta_tb
```

```

% вычисление параметров T1 и T2 по отрезкам
% Ta и Tb переходной функции звена второго пор.
Ta=input('Отрезок Ta = ');
Tb=input('Отрезок Tb = ');
a=Ta/Tb;
if a<3/exp(1)-1
d=.5; dn=1;
while abs(d-dn)>1e-7
dn=d; c=log(d)/(d-1);
d=d+a-exp(-c)*(c+1/d+1)+1;
end
T1=Tb*exp(log(d)/(1-d)); T2=T1/d;
disp('Вычисленные пост. времени')
disp(['T1 = ' num2str(T1)])
disp(['T2 = ' num2str(T2)])
else
disp(['Ta/Tb > 3/e-1 = ' num2str(3/exp(1)-1)])
disp('Решений нет.')
end

```

### Второй способ

Для идентификации по второму способу (по  $T_b$  и  $T_c$ ) вводятся две безразмерные переменные

$$x = \frac{T_b}{T_c}; \quad y = \frac{T_1 T_2}{T_c^2}$$

для которых можно получить из (3), (4) и (5) следующие выражения:

$$x = \frac{1}{1+d} d^{\frac{d}{d-1}}; \quad y = \frac{d}{(1+d)^2}. \quad (6)$$

Обычно, используя уравнения (6) как параметрические уравнения кривой  $y = f(x)$ , строят заранее эту кривую (см. ниже) и пользуются ею для идентификации в следующем порядке. По экспериментальной переходной характеристике находят  $T_b$  и  $T_c$  (см. рис. П1), вычисляют  $x = T_b/T_c$ , по кривой  $y = f(x)$  находят  $y$  (см. рис. П3).

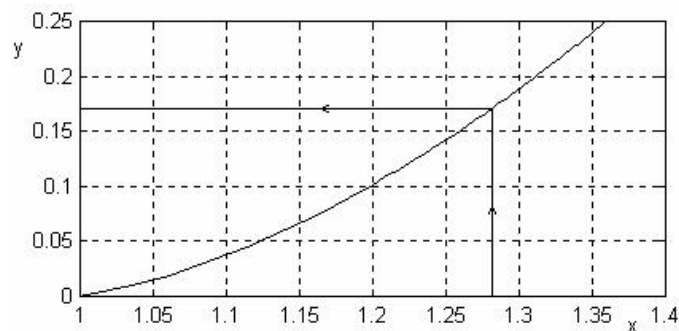


Рис. П3. График для вычисления  $y$  по  $x$ .

Искомые постоянные времени вычисляются затем по формулам

$$T_1 = T_c \frac{1 - \sqrt{1 - 4y}}{2}; \quad T_2 = T_c - T_1. \quad (7)$$

На ЭВМ эту же задачу можно решить, например, с помощью простой программы для пакета Matlab:

```

clc % tb_tc
% вычисление параметров T1 и T2 по отрезкам
% Tb и Tc переходной функции звена второго пор.
Tb=input('Отрезок Tb = ');
Tc=input('Отрезок Tc = ');
x=Tb/Tc;
if x>1 & x<exp(1)/2
d1=0; d2=1;
while abs(d1-d2)>1e-7
d=0.5*(d1+d2);
f=x-exp(d*log(d)/(d-1))/(1+d);
if f>0, d1=d; else d2=d; end

```



```

end
T1=Tc*d/(1+d); T2=Tc-T1;
disp('Вычисленные пост. времени')
disp(['T1 = ' num2str(T1)])
disp(['T2 = ' num2str(T2)])
else
disp(['Tb/Tc<1 или Tb/Tc>e/2=' num2str(exp(1)/2)])
disp('Решений нет.')
end

```

В программе методом половинного деления решается первое из уравнений (6) и по заданному  $x$  находится  $d$ . Затем  $T_1$  и  $T_2$  вычисляются по уравнениям (7) с учетом того, что после подстановки  $y$  из (6) в (7) для  $T_1$  получается выражение

$$T_1 = T_c \frac{d}{1+d}$$

### Колебательный характер экспериментальной переходной характеристики

В том случае, когда экспериментальная переходная характеристика обнаруживает колебательный характер (рис. П4), передаточную функцию ищут в виде

$$W(p) = \frac{K}{1 + 2\beta T_0 p + T_0^2 p^2}, \quad (8)$$

где  $\beta$  - степень затухания;  $T_0$  - постоянная времени звена.

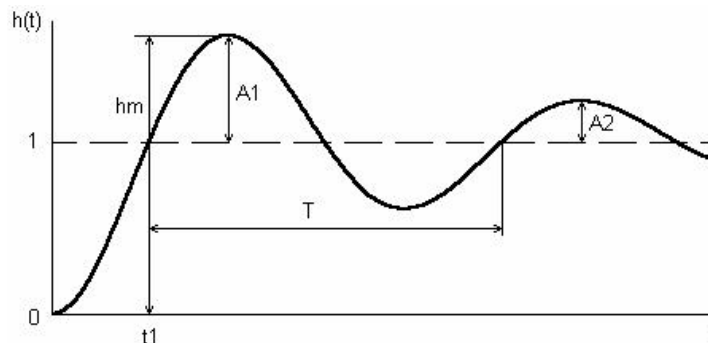


Рис. П4. Измеряемые отрезки на колебательной переходной функции

Считая по-прежнему, что статический коэффициент передачи  $K$  находится из статической характеристики объекта, положим  $K = 1$ . Тогда из экспериментальной переходной характеристики необходимо определить степень затухания  $\beta$  и постоянную времени  $T_0$ .

Для объекта с передаточной функцией (8) при  $K = 1$  переходная функция имеет вид

$$h(t) = 1 - e^{-\alpha t} \left( \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right), \quad (9)$$

где  $\alpha = \frac{\beta}{T_0}$  - коэффициент затухания,  $\omega = \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{T_0} = \frac{2\pi}{T}$  - круговая частота колебаний.

При малой степени затухания ( $0 < \beta < 0,4$ ) экспериментальная переходная функция имеет несколько максимумов и в этом случае обычно считают с экспериментальной кривой два последовательных переброса  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 4) и период колебаний  $T$ .

Искомые параметры вычисляются по формулам

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} \right)^2}}; \quad T_0 = \frac{T \sqrt{1-\beta^2}}{2\pi}. \quad (10)$$

### Большая степень затухания

При более сильном затухании ( $b > 0,4$ ) уже невозможно определить по экспериментальной кривой ни  $A_2$ , ни  $T$ . В этом случае считают с экспериментальной кривой первый максимум  $h_m$  (рис. П4) и момент  $t_1$  первого достижения уровня  $K = 1$ .

Для вычисления искомых параметров используют формулы

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln(h_m - 1)}\right)^2 + 1}}; \quad T_0 = \frac{t_1}{\left(\pi + \operatorname{arctg} \frac{\ln(h_m - 1)}{\pi}\right) \sqrt{\left(\frac{\ln(h_m - 1)}{\pi}\right)^2 + 1}}$$

Эффективность рассмотренных методов идентификации объектов второго порядка по переходной характеристике может быть оценена точностью восстановления параметров теоретической передаточной функции, когда описанные методы применяются к теоретически вычисленной переходной функции как к экспериментальной.

Очевидно, что точность восстановления параметров передаточной функции будет зависеть от шага по времени, с которым вычисляется переходная функция, от длительности переходной функции, от соотношения искомых постоянных времени, от точности и тщательности выполнения отсчетов по кривой переходной функции и ряда других факторов.

В данной работе предлагается выяснить влияние некоторых из этих факторов на точность идентификации.

m-файлы вычисления рисунков

```
% ris_01
clc; % рис. 1
K=1; T1=1; d=0.75; % d=T1/T2
tmax=7; dt=0.05;
t=0:dt:tmax;
ht=K*(1+(d*exp(-t/T1)-exp(-t*d/T1))/(1-d));
t0=T1*log(d)/(d-1);
h0=K*(1-(1+d)*d^(d/(1-d)));
tab=T1*(1+1/d+log(d)/(d-1));
ta=tab-T1*d^(1/(d-1));
figure(1)
ax=get(1,'CurrentAxes')
plot(t,ht,'k','LineWidth',1.5)
axis([0 tmax 0 1.05*K]);
set(ax,'Xtick',[],'Ytick',[])
l1=line([0 tmax],[K K]);
l2=line([t0 t0],[h0 K]);
l3=line([tab tab],[0 K]);
l4=line([ta tab],[0 K]);
set([l1 l2 l3 l4],'Color',[0 0 0])
set(l1,'LineStyle','--')
return

% ris_02
clc; % рис. 2
dd=0.01; d=dd:dd:1-dd;
f1=(1+1./d+log(d)/(d-1)).*d.^(1./(1-d))-1;
d0=[0 d 1]; f1=[0 f1 3/exp(1)-1];
subplot(1,2,1)
plot(d0,f1,'k'); grid
dk=0.45;f1k=(1+1/dk+log(dk)/(dk-1))*dk^(1/(1-dk))-1;
l1=line([0 dk],[f1k f1k]);
l2=line([dk dk],[0 f1k]);
set([l1 l2],'Color',[0 0 0])
f2=d.^(1./(1-d)); f2=[0 f2 1/exp(1)];
subplot(1,2,2)
plot(d0,f2,'k'); grid
f2k=dk^(1/(1-dk));
l1=line([0 dk],[f2k f2k]);
l2=line([dk dk],[0 f2k]);
```

```

set([l1 l2], 'Color', [0 0 0])
return

% ris_03
clc; % рис. 3
dd=0.01; d=dd:dd:1-dd;
x=d.^(d./(d-1))./(1+d);x=[1 x exp(1)/2];
d=[0 d 1];
y=d./(1+d).^2;
plot(x,y,'k'); grid
dk=0.28;
xk=dk^(dk/(dk-1))/(1+dk);
yk=dk/(1+dk)^2;
l1=line([1 xk],[yk yk]);
l2=line([xk xk],[0 yk]);
set([l1 l2], 'Color', [0 0 0])
return

% ris_04
tmax=12;
K=1; T0=1;
d=0.15;
b=d/T0;
w=sqrt(1-d^2)/T0;
t=0:0.01:tmax;
h=K*(1-exp(-b*t).*(cos(w*t)+(b/w)*sin(w*t)));
figure(1)
ax=get(1,'CurrentAxes')
hp=plot(t,h,'k','LineWidth',1.5);
axis([0 tmax 0 1.75]);
set(ax,'Xtick',[],'Ytick',[])
hk=line([0 tmax],[1 1]);
t1=T0/sqrt(1-d^2)*(pi-atan(sqrt(1-d^2)/d));
ta1=pi*T0/sqrt(1-d^2);A1=K*exp(-pi*d/sqrt(1-d^2));
h1=line([t1 t1],[0 K+A1]);
h2=line([ta1 ta1],[K K+A1]);
ta2=3*pi*T0/sqrt(1-d^2);A2=K*exp(-3*pi*d/sqrt(1-d^2));
h3=line([ta2 ta2],[K K+A2]);
h4=line([t1 ta1],[K+A1 K+A1]);
t2=t1+2*pi*T0/sqrt(1-d^2);
h5=line([t2 t2],[K 0.45*K]);
h6=line([t1 t2],[0.5*K 0.5*K]);
set([hk h1 h2 h3 h4 h5 h6], 'Color', [0 0 0])
set(hk, 'LineStyle', '--')
return

```

## Список рекомендуемой литературы

### Основной

1. Автоматизированное управление технологическими процессами: учеб. пособие / Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова; О.В. Назаров [и др.], под ред. В.Б. Яковлева. – Л.: изд-во ЛГУ, 1988. – 221 с.
2. Баранчукова, И.М., Соломенцев, Ю.М., Схиртладзе, А.Г. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения / И.М. Баранчукова; под ред. чл.-корр РАН Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 1999. – 416 с.
3. Бляхеров, Н.С. Автоматическая загрузка технологических машин. / Н.С. Бляхеров [и др.]: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990 – 400 с.
4. Брюханов, В.Н. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов С.П. Протопопов [и др.]: Учебник для машиностроит. вузов; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева.-2-е изд. – М.: Высш. шк., 1999. – 268 с.
5. Зелковиц, М., Принципы разработки программного обеспечения / М. Зелковиц, А. Шоу, Дж. Гэннон; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 368 с.

6. Испи, Т. Мехатроника. / Т. Испи; пер. с япон. Г.Л. Масленникова. – М.: Мир, 1988. – 314 с.
7. Крыленко, В.В. Управление автоматическими линиями с помощью ЭВМ / В.В. Крыленко [и др.] – М.: Машиностроение, 1983. – 152 с.
8. Кузнецов, М.М. Проектирование автоматизированного оборудования / М.М. Кузнецов, В.А. Усов, В.С. Стародубов; учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
9. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ / Э.Л. Тихомиров, В.В. Васильев, Б.К. Коровин, В.А. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1990 – 320 с.
10. Пуш, В.Э. Автоматические станочные системы. / В.Э. Пуш, – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
11. Шемелин, В.К. Проектирование систем управления в машиностроении / В.К. Шемелин; учебник для вузов. – М.: Изд-во «Станкин», 1998. – 254 с.

#### **Дополнительный**

12. Автоматизация информационного обеспечения научных исследований / А.А. Сточний, Ю.П. Каширин, С.К. Полумиенко [и др.]; под ред. А.А. Сточния; АН Укр. ССР. Институт кибернетики им. В.М. Глушкова. – Киев. Наук. думка, 1990. – 296 с.
13. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – 583 с.
14. Сибуя М., Ямамото Т. Алгоритмы обработки данных / М. Сибуя, Т. Ямамото; пер. с япон. – М. Мир, 1986. – 256 с.