

# **Автоматизация технологических процессов и производств**

Методы определения параметров  
объектов управления

Методические указания  
к выполнению практических заданий

**Санкт-Петербург  
2020**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

# **Автоматизация технологических процессов и производств**

**Методы определения параметров  
объектов управления**

**Методические указания  
к выполнению практических заданий**

Санкт-Петербург

2020

## УДК 62-5 (075)

Автоматизация технологических процессов и производств. Методы определения параметров объектов управления: методические указания к выполнению практических заданий / сост. Е. Н. Ковалев, А. В. Кулапина; ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2020. Ч. 1.– 38 с.

В настоящих методических указаниях описаны методы и даны примеры выполнения практических заданий по курсу «Автоматизация технологических процессов и производств». Предназначены для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Рецензенты:

заведующий кафедрой прикладной математики и информатики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент В.П. Яковлев

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой автоматизированного электропривода и электротехники Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 2 от 05.10.2020 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 3 от 24.11.2020 г.).

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ.....	5
1.1. Модели объекта на основе материального баланса.....	6
1.1.1. Модели объектов в системах регулирования уровня.....	7
1.2. Модели объекта на основе энергетического баланса.....	14
2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ.....	17
2.1. Идентификация объекта по графику переходной функции.....	17
2.2. Применение регрессионного анализа для идентификации.....	27
2.2.1. Идентификация объекта по характеристикам «вход – выход».....	27
2.2.2. Пример разработки многофакторной модели.....	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	37

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке алгоритмов управления сложным объектом необходим учет его динамических характеристик. Задача идентификации объекта управления состоит в разработке модели, которая позволяет предсказывать поведение объекта и определять эффективные воздействия с точки зрения целей управления. Например, в системе управления прокатным станом математическая модель объекта является составной частью системы автоматического регулирования толщины проката. Другой пример: одним из важных этапов разработки системы управления сложным технологическим объектом является этап FAT-тестов (FactoryAcceptanceTest – заводские приемочные испытания). В число испытаний FAT-тестов входит также проверка и отладка алгоритмов управления разрабатываемой системы. В этих проверках широко используются модели объектов управления, поскольку само технологическое оборудование на данном этапе недоступно. Модель объекта представляет собой программный блок в программном обеспечении управляющего контроллера. Функциональные зависимости между потоками входной и выходной информации модели соответствуют зависимостям между входными и выходными сигналами объекта.

Разработано множество различных методов определения параметров объекта, основанных на разнообразных подходах. В данных методических указаниях кратко описана методика идентификации на базе аналитического подхода и обработки результатов испытаний объекта; примеры в методических указаниях могут послужить образцом при выполнении практических заданий по курсу «Автоматизация технологических процессов и производств».

# 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ

Если известна конструкция объекта управления и физическая сущность протекающих в нем процессов, модель можно найти аналитически – вывести уравнения, связывающие входные и выходные переменные объекта. Передаточные функции – один из наиболее часто применяемых видов моделей.

Например, передаточные функции двигателя постоянного тока независимого возбуждения выводятся из следующих уравнений, описывающих процессы в двигателе:

$$\begin{aligned}u_B &= L \frac{di_B}{dt} + r_B i_B, \\u_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} + e_{\text{я}}, \\J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H, \\ \Phi_B &= k_{\Phi} i_B, \\e_{\text{я}} &= k_E \omega_m \Phi_B, \\M_{\text{я}} &= k_M i_{\text{я}} \Phi_B,\end{aligned}$$

где  $L_{\text{я}}$  – индуктивность цепи якоря (включая добавочные полюсы), Гн;

$L$  – индуктивность обмотки возбуждения, Гн;

$r_{\text{я}}$  – сопротивление цепи якоря, Ом;

$r_B$  – сопротивление цепи возбуждения, Ом;

$J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя,  $\text{Нм}^2$ ;

$k_E$  – константа =  $R_{\text{п}} \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a)$  ;

$k_M$  – константа =  $R_{\text{п}} \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a) = k_E$  ;

$u_B$  – напряжение питания цепи возбуждения, В;

$u_{\text{я}}$  – напряжение питания цепи якоря, В;

$i_{\text{я}}$  – ток цепи якоря, А;

$i_B$  – ток цепи возбуждения, А;

$\Phi_B$  – поток возбуждения, Вб;

$M$  – момент двигателя, Нм;

$M_H$  – момент сопротивления (момент нагрузки), Нм;

$\omega_m$  – скорость вращения ротора, рад/с;

$R_p$  – число пар полюсов;

$N$  – число активных стержней якоря;

$a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Предлагается самостоятельно вывести передаточные функции, определяющие следующие соотношения вход/выход:

- Напряжение якоря – Скорость двигателя,
- Момент сопротивления – скорость двигателя,
- Момент сопротивления – ток двигателя,
- Ток возбуждения – ЭДС двигателя.

### 1.1. Модели объектов на основе материального баланса

Материальный баланс в статике: сумма всех входящих и выходящих материальных потоков равна 0. Входящие потоки  $F_i$  суммируются со знаком «плюс», выходящие – со знаком «минус»:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0 . \quad (1.1)$$

Приведенное выше уравнение может применяться для расчета не измеряемых расходов. Например, имеется два входных потока – один измеряемый  $F_1$ , другой неизмеряемый  $F_2$  и измеряемый выходной поток  $F_3$ . Тогда для косвенного измерения потока  $F_2$  может быть использована модель

$$F_2 = F_3 - F_1. \quad (1.2)$$

Для расчета конкретных потоков используются математические выражения, определяемые методом измерения и конструкцией датчика.

Например, используют измерительные устройства, в которых информацией о расходе является перепад на сужающем устройстве – диафрагме (см. рисунок 1).

В этом случае объемный расход  $F$  (м<sup>3</sup>/с) рассчитывается по модели:

$$F = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1.3)$$

где  $\Delta P$ – перепад давления на сужающем устройстве, кгс/м<sup>2</sup>;

$d$ – диаметр отверстия сужающего устройства, мм;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  – поправочный множитель на расширение сжимаемой среды, для несжимаемых жидкостей  $\varepsilon = 1$ ;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от конструкции диафрагмы.

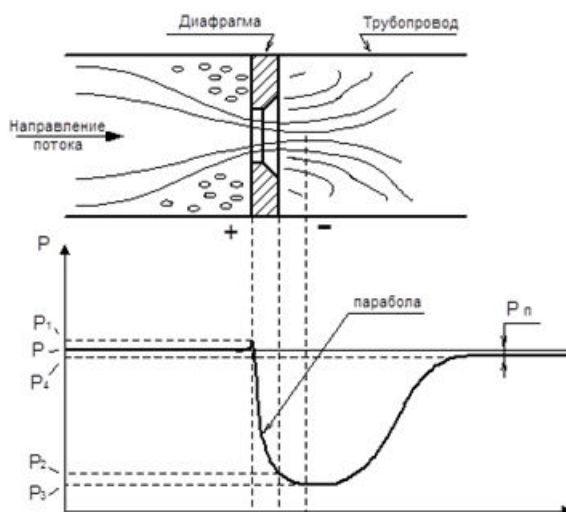


Рисунок 1 – Давление потока после диафрагмы

В системах управления часто важным является не собственно абсолютное значение расхода, а его изменение. В составе встроенного программного обеспечения многих управляющих контроллеров есть алгоритмический блок, вычисляющий значение расхода в процентах по значению перепада давления, которое также задается в процентах.

### 1.1.1. Модели объектов в системах регулирования уровня

**Пример 1.1.** Объект управления представляет собой емкость с одним входным потоком и одним выходным потоком (рисунок 2).



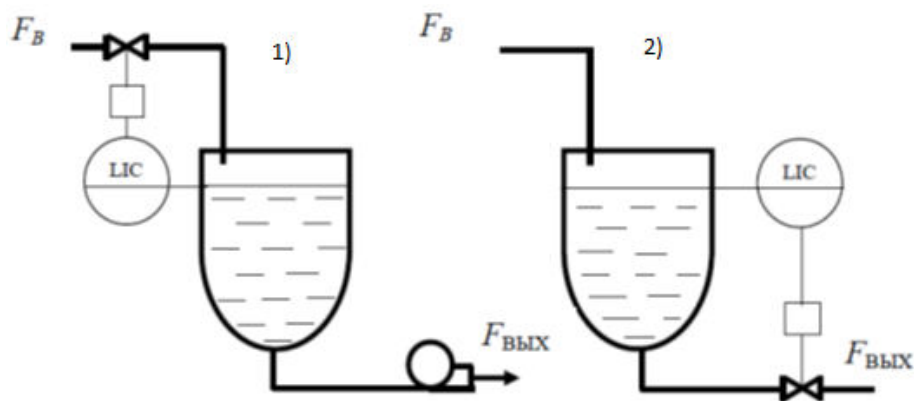


Рисунок 2 – Функциональные схемы автоматического управления уровнем

В емкости величина притока не зависит от уровня  $h$ , так как емкость находится под атмосферным давлением и жидкость притекает из трубы, конец которой находится на уровне жидкости. Сток из емкости происходит через насос, поэтому величина стока также не зависит от уровня.

Уравнение материального баланса:

$$T \frac{dh}{dt} = F_{ВХ} - F_{ВЫХ}, \quad (1.4)$$

Видно, что размерность в правой части уравнения при объемном расходе –  $\text{м}^3/\text{с}$ . Чтобы размерность левой части уравнения совпала с правой, коэффициент  $T$  должен измеряться в  $\text{м}^2$ . Это есть площадь сечения емкости.

### **Вариант 1**

Модель в форме передаточной функции по каналу управления:

$$W(s) = \frac{1}{Ts}. \quad (1.5)$$

Модель по каналу возмущения

$$W(s) = -\frac{1}{Ts}. \quad (1.6)$$

### **Вариант 2**

Для второго варианта системы автоматического регулирования модели по каналу управления и возмущения поменяются местами.

Объект управления в этом примере описывается идеальным интегрирующим звеном с постоянной времени  $T$ .

### Вариант 3

В этом варианте (см. рисунок 3) насос отсутствует, а жидкость вытекает самотёком. Выходной поток не является уже независимой переменной, он будет зависеть от того, насколько наполнена емкость:

$$T \frac{dh}{dt} = F_{ВХ} - b\sqrt{h}, \quad (1.7)$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от свойств жидкости.

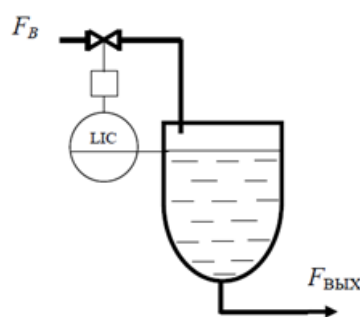


Рисунок 3 – Жидкость из ёмкости вытекает самотёком

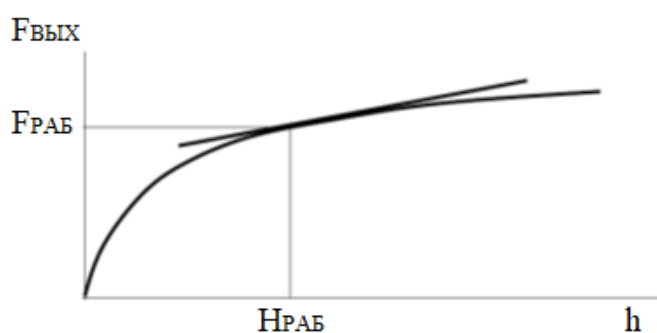


Рисунок 4 – Зависимость выходного потока от уровня

Аппроксимируем нелинейную статическую характеристику в окрестности рабочей точки  $L_{РАБ}$  прямой линией, тангенс угла наклона которой определяется отношением приращения выходного расхода  $\Delta F_{ВЫХ}$  к приращению уровня  $\Delta L$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \Delta F_{ВЫХ} / \Delta L. \quad (1.8)$$

Запишем уравнение материального баланса в приращениях, в окрестности рабочей точки, соответствующее линейной статической характеристике:

$$T \frac{dh}{dt} = f_{\text{ВХ}} - \text{tg}\alpha h, \quad (1.9)$$

где  $f_{\text{ВХ}} = F_{\text{ВХ}} - F_{\text{ВХ.РАБ}}$  – приращение управляющего воздействия относительно его рабочего значения  $F_{\text{ВХ.РАБ}}$ ;

$h = L - L_{\text{РАБ}}$  – приращение выходной переменной относительно ее рабочего значения  $L_{\text{РАБ}}$ .

Перепишем уравнение материального баланса в более удобном виде:

$$\frac{T}{\text{tg}\alpha} \frac{dh}{dt} + h = \frac{1}{\text{tg}\alpha} f_{\text{ВХ}} \quad \text{или}$$

$$T_1 \frac{dh}{dt} + h = k f_{\text{ВХ}}, \quad (1.10)$$

где

$$T_1 = \frac{T}{\text{tg}\alpha}, \quad k = \frac{1}{\text{tg}\alpha}$$

### Пример 1.2. Гидравлический аккумулятор

В емкость, заполненную воздухом, непрерывно подается масло. Из аккумулятора оно поступает неравномерно, в зависимости от необходимости. При этом происходят колебания уровня в емкости, которые вызывают колебания давления, влияющего на приток и сток.

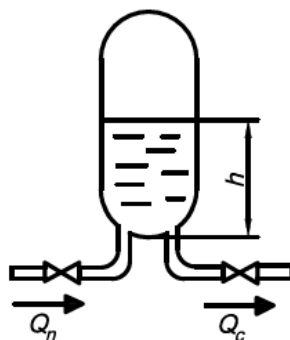


Рисунок 5 – Гидравлический аккумулятор

Приток и сток в объект определяются выражениями

$$\begin{aligned} Q_{\text{п}} &= C_{\text{п}} F_{\text{п}} \sqrt{P_1 - P_0}, \\ Q_{\text{с}} &= C_{\text{с}} F_{\text{с}} \sqrt{P_0 - P_2}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $C_{\text{п}}$   $C_{\text{с}}$  - постоянные коэффициенты;

$P_1$  - давление в напорном трубопроводе;

$P_0$  - давление в ёмкости;

$P_2$  - давление в сливном трубопроводе;

$F_{\text{п}}$  - условный проход задвижки на притоке (сечение прохода);

$F_{\text{с}}$  - условный проход задвижки на стоке.

Между уровнем масла в емкости и объемом газовой подушки над маслом существует зависимость следующего вида:

$$V_{\text{max}} = (1 - h / h_{\text{max}}) V_{\text{max}}, \quad (1.12)$$

где  $V_{\text{max}}$  - объем резервуара;

$h_{\text{max}}$  - высота резервуара.

Давление в емкости при условии, что оно создано подъемом уровня, равно

$$P_0 = (V_{\text{max}} / V) \cdot P_m \text{ или } P_0 = h_{\text{max}} / (h_{\text{max}} - h) \cdot P_m. \quad (1.13)$$

Зависимости притока и стока от уровня масла в емкости:

$$Q_{\text{п}} = C_{\text{п}} F_{\text{п}} \sqrt{P_1 - h_{\text{max}} / (h_{\text{max}} - h) \cdot P_m}, \quad (1.14)$$

$$Q_{\text{с}} = C_{\text{с}} F_{\text{с}} \sqrt{h_{\text{max}} / (h_{\text{max}} - h) \cdot P_m - P_2},$$

Из последних двух уравнений определяется уравнение гидравлического аккумулятора:

$$\frac{dh}{dt} = C_p F_p \sqrt{P_1 - \frac{h_{\max}}{(h_{\max} - h)} P_m} - C_c F_c \sqrt{\frac{h_{\max}}{(h_{\max} - h)} P_m - P_2} .$$

### Пример 1.3. Смеситель

Объект управления представляет собой смеситель ( рисунок 6 ), в котором с помощью мешалки перемешиваются два входных потока: поток  $F_1$  с концентрацией определенного вещества  $C_1$  и поток  $F_2$  с концентрацией такого же вещества  $C_2$ . Выходной поток  $F_c$  имеет концентрацию  $C_c$ , более равномерную, конечно, чем у входных потоков. Технологический процесс непрерывный, т. е. входные и выходной потоки являются непрерывными.

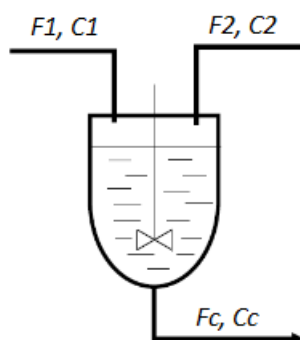


Рисунок 6 – Смеситель

Запишем модель процесса смешения на основе материального баланса. В качестве мгновенно изменяющейся переменной возьмем выходную переменную объекта управления – концентрацию выходного потока  $C_c$  :

$$V \frac{dC_c}{dt} = F_1 C_1 + F_2 C_2 - F_c C_c , \quad (1.15)$$

где  $F_1, F_2, F_c$  – объемные потоки, м<sup>3</sup>/с ;

$C_1, C_2, C_c$  – концентрации, кг/м<sup>3</sup> ;

$V$  – рабочий объем смесителя, м<sup>3</sup> .

Если за переменные входные величины принять концентрации входных потоков, то модель может быть записана в таком виде:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_1 C_1(t) + k_2 C_2(t) , \quad (1.16)$$

где  $y(t)$  – выходная переменная  $C_c$ ;

$T$  – постоянная времени,  $T = V / F_c$ ;

$k_1, k_2$  – коэффициенты усиления по входным переменным;

$$k_1 = \frac{F_1}{F_c}, \quad k_2 = \frac{F_2}{F_c}.$$

Структурная схема представлена на рисунке 7.

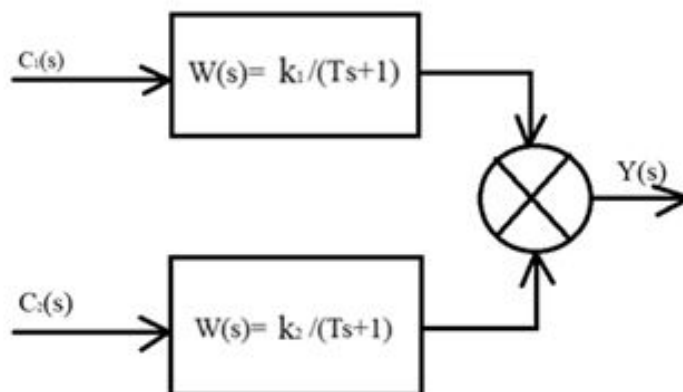


Рисунок 7 – Структурная схема смесителя

При моделировании предполагалось, что входные потоки не меняются и равны определенным величинам, а их концентрации могут изменяться.

#### **Пример 1.4. Модели идеального перемешивания и идеального вытеснения**

*Модель идеального перемешивания* описывает непрерывно действующий смеситель с одним входным потоком.

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}, \quad T = \frac{V}{F}. \quad (1.17)$$

Здесь  $V$  – объем смесителя, а  $F$  – рабочее значение потока, который проходит через него, входной поток в данном случае равен выходному.

*Модель идеального вытеснения* представляет собой звено идеального запаздывания:

$$W(s) = e^{-T_z s}, \quad T_z = L / v, \quad (1.18)$$

где  $T_z$  – время транспортного запаздывания;

$L$  – длина технологической линии, м;

$v$  – линейная скорость потока, м/с.

С помощью типовых моделей возможно получать модели реальных технологических процессов. Допустим, технологический процесс состоит из двух последовательно включенных смесителей, соединенных достаточно длинной трубой (рисунок 8).

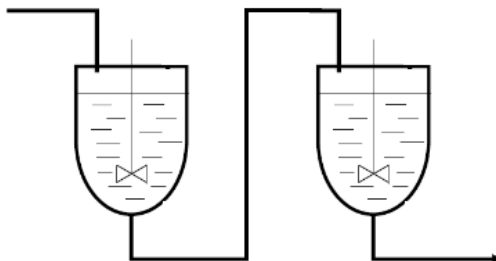


Рисунок 8 – Два последовательных смесителя

Модель в виде передаточной функции для такого объекта собирается из типовых моделей:

$$W(s) = \frac{e^{-T_3s}}{(Ts+1)^2} \cdot \quad (1.19)$$

## 1.2. Модели объекта на основе энергетического баланса

Энергетический баланс в статике: сумма всех входящих и выходящих энергетических потоков равна 0. Входящие потоки  $Q_i$  суммируются со знаком «плюс», выходящие – со знаком «минус»:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0. \quad (1.20)$$

*Энергетический баланс в статике* используется для расчета потребления тепла. В любую систему, потребляющую тепло, оно доставляется с потоком теплоносителя. При этом система потребления тепла может быть закрытой, когда входной поток (прямой)  $F_{\text{ПР}}$  равен выходному потоку (обратному)  $F_{\text{ОБР}}$ , или открытой, когда выходной поток меньше входного.

Например, если есть возможность слива воды из батареи отопления, это открытая система.

Модель расчета потребления тепла для открытой системы:

$$Q = [F_{\text{ПР}}(t_{\text{ПР}} - t_0) - F_{\text{ОБР}}(t_{\text{ОБР}} - t_0)] C\rho, \quad (1.21)$$

где  $F_{\text{ВХ}}, F_{\text{ОБР}}$  – прямой и обратный потоки, м<sup>3</sup>/с;

$t_{\text{ПР}}, t_{\text{ОБР}}$  – температура этих потоков, °С;

$t_0$  – температура на входе источника тепла, обычно 5 °С или 0 °С;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – удельная теплоемкость, Дж/кг град.

Для закрытой тепловой системы модель проще:

$$Q = FC\rho(t_{\text{ПР}} - t_{\text{ОБР}})Q. \quad (1.22)$$

### *Энергетический баланс в динамике*

**Пример 1.5.** Рассмотрим пример применения энергетического баланса для построения математической модели, описывающей изменение температуры в аппарате-смесителе, в котором смешиваются два входных потока: горячий и холодный.

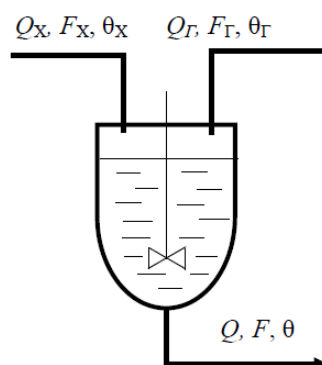


Рисунок 9 – Смеситель

Тепловой баланс во время работы смесителя определяется уравнением:

$$MC \frac{d\theta}{dt} = Q_{\text{ВХ}} - Q_{\text{ВЫХ}}, \quad (1.23)$$

где  $M$  – масса вещества в смесителе, кг;

$C$  – удельная теплоемкость, Дж/кг град;

$\theta$  – температура вещества в смесителе, °С; /средняя температура



$Q_{\text{ВХ}}, Q_{\text{ВЫХ}}$  – входной и выходной потоки тепла.

Сделаем два упрощения:

во-первых, не будем учитывать рассеиваемое тепло, обычно это относительно малая величина.

во-вторых, будем рассматривать тепловой баланс относительно средней температуры выходного потока. Если температура регулируется автоматически, то это значение температуры дается в качестве задания для системы автоматического регулирования. Тогда входной холодный поток надо учитывать со знаком «минус», так как он понижает температуру в смесителе. Уравнение баланса примет вид:

$$MC \frac{d\theta}{dt} = Q_{\Gamma} - Q_{\text{X}} - Q, \quad (1.24)$$

где  $Q_{\Gamma} = C \cdot F_{\Gamma} \cdot \rho \cdot \theta_{\Gamma}$ ;

$Q_{\text{X}} = C \cdot F_{\text{X}} \cdot \rho \cdot \theta_{\text{X}}$ ;

$Q = C \cdot F \cdot \rho \cdot \theta$ ;

$F_{\Gamma}, F_{\text{X}}, F$  – объемные горячий, холодный и выходной потоки, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{\Gamma}, Q_{\text{X}}, Q$  – тепловые входные и выходные потоки, Дж/с;

$\theta_{\Gamma}, \theta_{\text{X}}, \theta$  – температура холодного, горячего и выходного потоков.

Учитывая, что  $M = \rho V$ , получим следующее уравнение:

$$\frac{V}{F} \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{F_{\Gamma} \theta_{\Gamma}}{F} - \frac{F_{\text{X}} \theta_{\text{X}}}{F}. \quad (1.25)$$

При практическом использовании этой модели следует учесть, что будет принято за входные переменные, а что будет задано в виде постоянных значений. Обычно переменными являются входные потоки, а их температуры задаются в виде числовых значений.

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрим некоторые методы идентификации, основанные на анализе переходных характеристик объекта. Напомним: переходная функция  $h(t)$  является реакцией линейного динамического объекта на единичное ступенчатое воздействие  $l(t)$ . У идеального ступенчатого сигнала время нарастания сигнала равно нулю, что физически невозможно. Поэтому  $l(t)$  является идеализированной аппроксимацией реального ступенчатого воздействия.

### 2.1. Идентификация объекта по графику переходной функции

В инженерной практике получили распространение графоаналитические методы, позволяющие по виду переходной функции рассчитать коэффициенты модели известной структуры.

Объекты управления разделяют на объекты с самовыравниванием и объекты без самовыравнивания. Объекты с самовыравниванием – это устойчивые объекты, в которых при  $t \rightarrow \infty \quad h(t) \rightarrow H_0$ ,

где  $H_0$  - конечная ограниченная величина.

В общем виде переходные функции  $h(t)$  для объектов управления с самовыравниванием (называемые также статическими или  $S$ -образными) характеризуются следующими показателями, определяющими статику и динамику объекта:

$\tau$  – запаздывание, с;

$T_a$  – постоянная времени, с;

$k_0$  – коэффициент усиления.

Известно, что запаздывание можно разделить на транспортное и емкостное. Транспортное, или чистое, запаздывание  $\tau_0$  определяется временем переноса рассматриваемой среды (рабочего тела), емкостное  $\tau_e$  – аккумулярованием среды.

Таким образом,  $\tau = \tau_0 + \tau_e$ .

В общем виде переходные функции  $h(t)$  объектов без самовыравнивания (называемые астатическими или I-образными) характеризуются следующими показателями:

$\tau$  – запаздывание, с;

$\varepsilon$  – скорость разгона.

### Пример 2.1. Аperiodическое звено первого порядка

На рисунках 10 и 11 показаны известные способы определения параметров аperiodического звена по переходной характеристике.

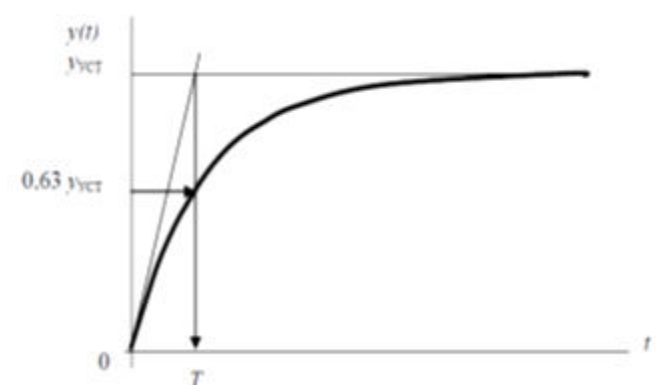


Рисунок 10 – Определение постоянной времени аperiodического звена первого порядка

$$k = y_{уст} / x_0$$

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1}$$

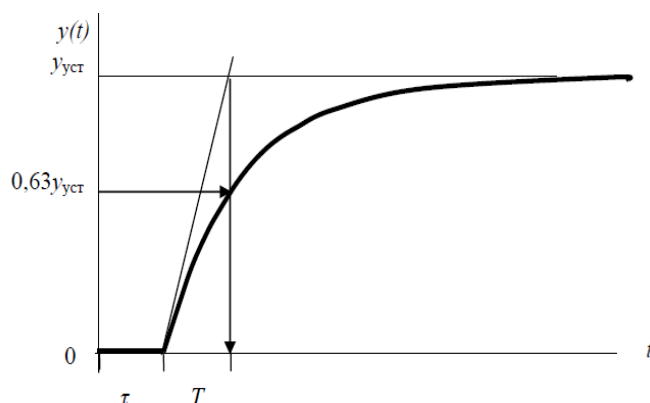


Рисунок 11 – Определение постоянной времени аperiodического звена первого порядка с запаздыванием

$$k = y_{уст} / x_0$$

$$W(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts+1}$$

### Пример 2.2. Аperiodические звенья высоких порядков

Переходная характеристика периодического звена высокого порядка показана на рисунке 12.

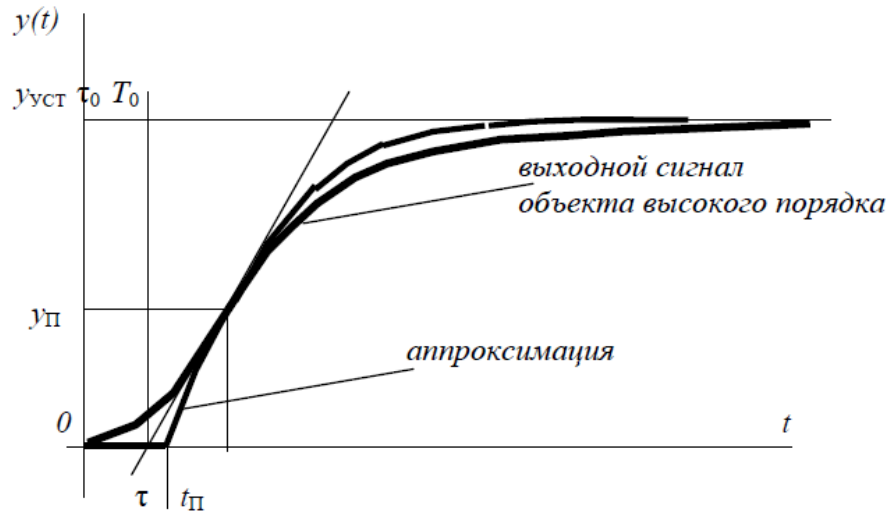


Рисунок 12 – Аппроксимация аperiodического звена высокого порядка

При идентификации таких объектов их аппроксимируют более простыми звеньями с передаточной функцией

$$W_A = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)^n} \text{ или } W_A = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1 s+1)^n}. \quad (2.1)$$

Существуют инженерные методики определения значений  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $n$ ,  $\tau$  с помощью специальных таблиц и значений  $T_0$ ,  $\tau_0$ ,  $t_{п}$ ,  $y_{п}$ , взятых из графика переходной функции исследуемого объекта. Значение коэффициента усиления  $k$  определяется как  $k = y_{уст} / x_0$ ,  $x_0$  – значение ступенчатого воздействия на входе объекта.

### Пример 2.3. Колебательное звено второго порядка

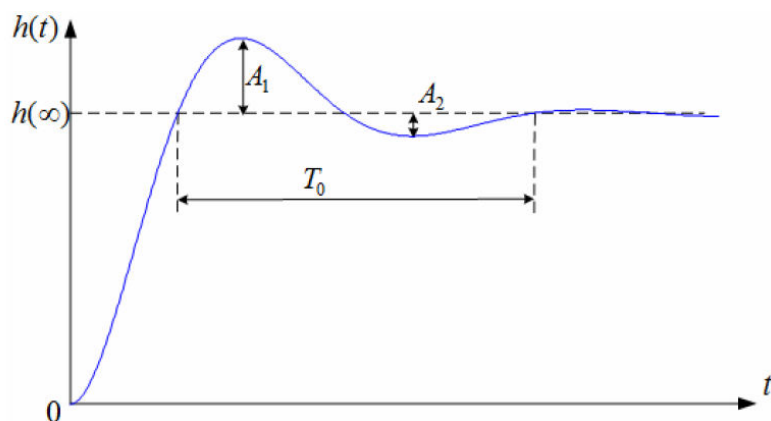


Рисунок 13 – Переходная характеристика звена второго порядка

Колебательный объект второго порядка имеет передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (2.2)$$

где  $\xi < 1$ . Для определения приближенных значений  $T$  и  $\xi$  по переходной характеристике (см. рисунок 13) можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{(\ln \frac{A_1}{A_2})^2}}}, \quad T = T_0 \frac{\xi}{2 \ln \frac{A_1}{A_2}}.$$

### Пример 2.4. Интегрирующие звенья (объекты без самовыравнивания)

На рисунках 14, 15 представлены переходные характеристики идеального и реального интегрирующих звеньев.

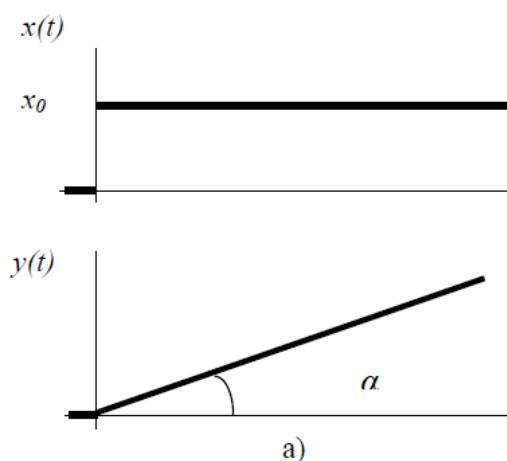


Рисунок 14 – Идеальное интегрирующее звено

$$Ty' = x(t);$$

$$y' = \frac{\Delta y}{\Delta t};$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \operatorname{tg} \alpha;$$

$$T = \frac{x_0}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Для реальных интегрирующих звеньев переходная характеристика вначале имеет небольшой наклон (объект как бы разгоняется), а затем уже изменяется с постоянным углом  $\alpha$ .

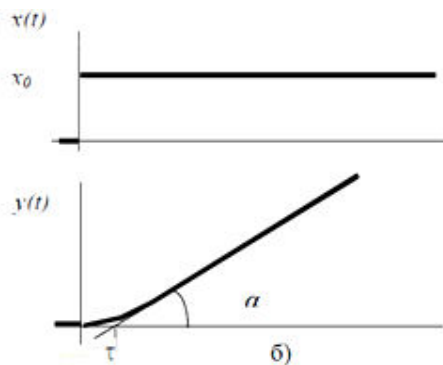


Рисунок 15 – Реальное интегрирующее звено (с запаздыванием)

$$W(s) = \frac{e^{-\tau s}}{Ts}.$$

### Пример 2.5. Модель уровня в барабане парового котла

На первый взгляд, имеем объект, представляющий собой идеальное интегрирующее звено с двумя входными воздействиями: расходом питательной воды и расходом пара от котла (рисунок 16). Однако если скачком увеличить расход пара, то в действительности уровень сначала быстро возрастает («вскипает») и лишь спустя некоторое время начинает меняться в «правильном» направлении. Объясняется это тем, что в экранных трубах и барабанах котлов высокого давления находится не вода, а пароводяная смесь, объем которой зависит от давления. Увеличение открытия парового клапана приводит к немедленному падению давления над поверхностью испарения в барабане, объем пароводяной смеси увеличивается, что проявляется во

временном увеличении уровня. Такой же эффект наблюдается и при увеличении подачи питательной воды, но в другом направлении.

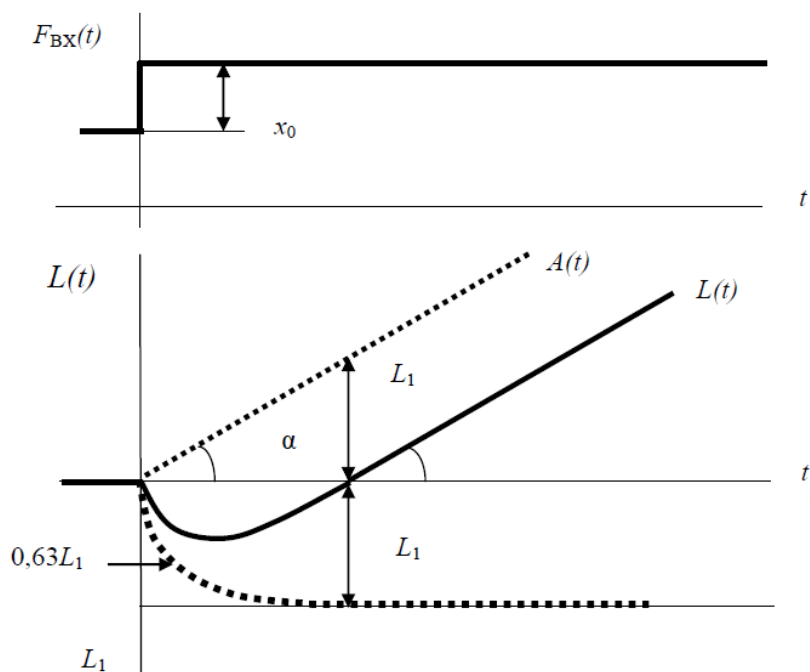


Рисунок 16 – Изменение уровня в барабане парового котла

Выполним следующие вспомогательные действия:

1. Проведем из начала координат линию  $A(t)$  под углом  $\alpha$ ;
2. Измерим расстояние  $L_1$  от линии  $A(t)$  до оси времени в момент появления положительного значения переходной функции  $L(t)$ ;
3. Отложим значение  $L_1$  вниз от начала координат;
4. Построим переходную функцию аperiodического звена первого порядка  $F(t)$ , которая выходит из начала координат и достигает установившегося значения в момент перехода  $L(t)$  через ноль.

Тогда  $L(t)=A(t) - F(t)$ . Поскольку объект линейный, такое же соотношение справедливо для передаточных функций:  $W(s)=W_{И}(s) - W_{А}(s)$ ,

где  $W(s)$  – звено с переходной функцией  $L(t)$ ;

$W_{И}(s)$  – интегрирующее звено с переходной функцией  $A(t)$ ;

$W_{А}(s)$  – аperiodическое звено с переходной функцией  $F(t)$ .

$$W(s) = \frac{1}{T_1 s} - \frac{k}{T_2 s + 1} = \frac{1 + (T_2 - kT_1)s}{T_1 s(T_2 s + 1)}, \quad T_1 = \frac{x_0}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad k = \frac{L_1}{x_0} \quad (2.3)$$

### Метод $n$ -го порядка (метод В. Стрейца)

Этот метод используется для определения параметров передаточной функции объекта, описываемой  $n$ -звеньями с одинаковой постоянной времени  $T$  при скачкообразном возмущении.

К переходной характеристике в точке перегиба проводится касательная, что позволяет определить времена  $\tau$  и  $T_a$  (рисунок 17).

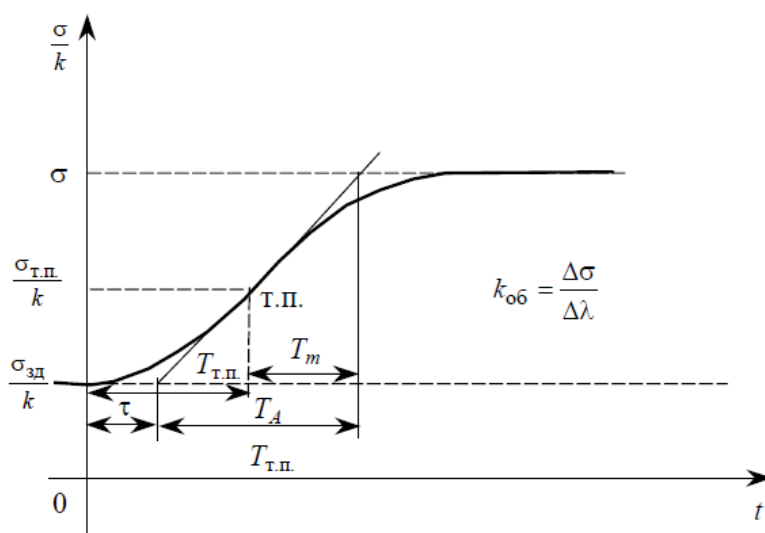


Рисунок 17 – Определение запаздывания и постоянной времени методом В.Стрейца

В таблице 1 и на рисунке 18 приведены соотношения времен  $\tau$ ,  $T_a$ ,  $T$  в функции  $n$ .



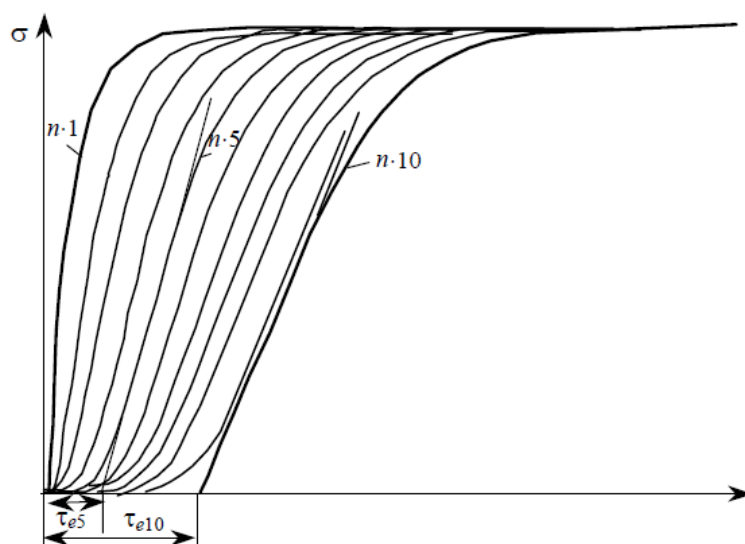


Рисунок 18 – Зависимость  $\tau$  и  $T$  от числа звеньев  $n$

Таблица 1 – Соотношения времен  $\tau$ ,  $T_a$ ,  $T$  в функции  $n$

$n$	$T_a / \tau$	$T_m / T_a$	$\tau / T$	$T_a / T$
1		1,00	0,00	1,00
2	9,65	0,74	0,28	2,72
3	4,59	0,68	0,81	3,70
4	3,13	0,65	1,43	4,46
5	2,44	0,63	2,10	5,12
6	2,03	0,62	2,81	5,70
7	1,75	0,61	3,55	6,23
8	1,56	0,60	4,31	6,71
9	1,42	0,59	5,08	7,17
10	1,29	0,59	5,87	7,59

Процедура идентификации объекта по переходной характеристике  $n$ -звеньями с одинаковыми постоянными времени следующая:

- 1) по графику переходной характеристики определяются времена  $\tau$  и  $T_a$ ;
- 2) по отношению  $T_a/\tau$  находится число  $n$  с помощью табл. 1;
- 3) в зависимости от числа звеньев  $n$  по величине  $T_a/\tau$ , найденной в п. 2, по  $T_a$  рассчитывается  $T$ . Аналогично можно использовать отношение  $\tau / T$  и время запаздывания  $\tau$ .

Коэффициент усиления определяется как обычно.

Метод также применим к объектам с чистым запаздыванием в тех случаях, когда оно меньше 30 % постоянной времени. В этом случае время запаздывания на рисунке 17 равно:

$$\tau = \tau_0 + \tau_e, \quad (2.4)$$

где  $\tau_0$  – время чистого запаздывания,

$\tau_e$  – емкостное запаздывание.

С другой стороны, отношение  $T_a/\tau$  позволяет по таблице 1 выбрать  $n$  (при промежуточных значениях берутся меньшие значения).

Из таблицы по  $\tau/T_a$  выбирают  $n$  и по известному  $T_a$  и отношению  $T_a/T$  находят  $T$  и  $\tau_e$ . Чистое запаздывание определяется следующим образом:

$$\tau_0 = \tau - \tau_e.$$

### Пример 2.6. Объект с несколькими постоянными времени

Применение метода  $n$ -звеньев с равными постоянными времени рассмотрим на примере объекта, переходная характеристика  $\sigma(t)$  которого приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Значения выходной величины во времени

t	$\sigma(t) \cdot 10^{-3}$	t	$\sigma(t)$	t	$\sigma(t)$	t	$\sigma(t)$	t	$\sigma(t)$	t	$\sigma(t)$
0,0	0,0	14,0	0,6	28,0	8,7	42,0	9,8	56,0	9,9	70,0	10,0
2,0	0,9	16,0	4,6	30,0	9,0	44,0	9,9	58,0	9,9	72,0	10,0
4,0	55,9	18,0	5,6	32,0	9,3	46,0	9,9	60,0	9,9	74,0	10,0
6,0	307,9	20,0	6,5	34,0	9,9	48,0	9,9	62,0	9,9	76,0	10,0
8,0	0831,5	22,0	7,2	36,0	9,6	50,0	9,9	64,0	9,9	78,0	10,0
10,0	1624,7	24,0	7,8	38,0	9,7	52,0	9,9	66,0	9,9	80,0	10,0
12,0	2588,9	26,0	8,3	40,0	9,8	54,0	9,98	68,0	10,0	-	-

Величина скачкообразного возмущения  $\Delta\lambda = 4$ . Используем метод равных постоянных.

1. Определение коэффициента усиления.

Из таблицы очевидно, что  $\Delta\sigma=10$  , а  $\Delta\lambda= 4$  , следовательно, коэффициент усиления

$$K = \Delta\sigma / \sigma\lambda = 10 / 4 = 2,5$$

## 2. Определение числа звеньев $n$ .

По данным таблицы строится график изменения выходной величины (рисунок 19).

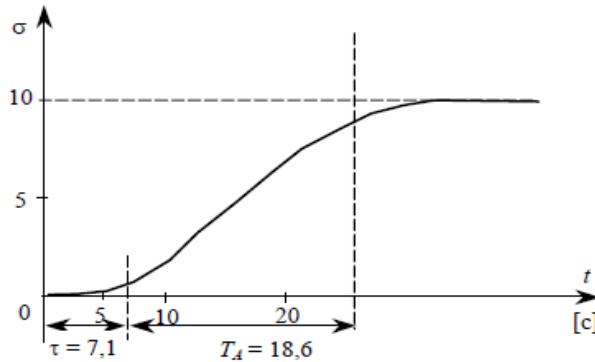


Рисунок 19 – Переходная характеристика объекта с запаздыванием  $\tau$  и постоянной времени  $T_a$

Проведя касательную через точку перегиба, получим  $\tau = 7,1$  с и  $T_a=18,6$  с.

Отношение  $T_a / \tau = 18,6 / 7,1 = 2,62$  соответствует промежуточному значению  $n$  между  $n_1 = 4$  и  $n_2 = 5$  .

Берем  $n = 4$  . По отношению  $T_a / \tau$  видно, что оно отличается от табличного; это значит, что объект регулирования имеет чистое запаздывание.

## 3. Расчет $T$ .

Из таблицы берем для  $n = 4$

$$T_a / T = 4,46 \text{ или } T = T_a / 4,46 ,$$

а так как по рис. 19  $T_a=18,6$  с , то постоянная времени

$$T = 18,6 / 4,46 = 4,17 \text{ с.}$$

## 4. Расчет чистого запаздывания $\tau_0$ . Из таблицы 1 по $n = 4$ имеем

$$\tau / T = 1,43.$$

Рассчитаем по  $T = 4,17$  с ,  $\tau_e = 4,17 \cdot 1,43 = 5,96$  .

Разница общего времени запаздывания и емкостного запаздывания дает чистое запаздывание:

$$\tau_0 = \tau - \tau_e = 7,1 - 5,96 = 1,14 \text{ с} .$$

По этим полученным величинам имеем передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{2,5e^{-1,14s}}{(4,17s+1)^4} .$$

## 2.2. Применение регрессионного анализа для идентификации

Регрессионный анализ — набор статистических методов исследования влияния одной или нескольких независимых переменных  $X_1, X_2, \dots, X_n$  на зависимую переменную  $Y$ . Термины «зависимые» и «независимые» переменные отражают лишь математическую зависимость переменных, а не причинно-следственные отношения. Наиболее распространенный вид регрессионного анализа — линейная регрессия, когда находят линейную функцию, которая, согласно определенным математическим критериям, наиболее соответствует данным. Например, в методе наименьших квадратов вычисляется прямая, сумма квадратов между которой и данными минимальна. Формула линейной регрессии следующая:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + \dots + A_iX_i + \dots + A_nX_n, \quad (2.5)$$

где  $Y$  — зависимая переменная;

$X$  — независимые переменные, влияющие на нее;

$A$  — коэффициенты регрессии.

Регрессионный анализ является одним из самых востребованных методов статистического исследования. В функционале MicrosoftExcel имеются инструменты, предназначенные для проведения подобного вида анализа.

Сбор информации о переменных  $X_1, X_2, \dots, X_n, Y$  технологического объекта выполняется средствами системы автоматизации.

### 2.2.1. Идентификация объекта по характеристикам «вход– выход»

Требуется по реальным трендам входной  $x(t)$  и выходной  $y(t)$  величин подобрать некую аппроксимирующую передаточную функцию (модель), которая с достаточной точностью описывала бы поведение реального объекта.

Шаг 1. Измерения параметров объекта  $x(t)$ ,  $y(t)$  брать через одинаковые промежутки времени (период квантования) и привести в табличную форму  $x[n]$ ,  $y[n]$ .

Шаг 2. Задаемся видом передаточной функции объекта  $W_0(z)$ . Обратите внимание на то, что передаточная функция  $W_0(z)$  должна быть расписана по отрицательным степеням оператора «z».

$$W_0(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_n \cdot z^{-n}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_n \cdot z^{-n}} \quad (2.6)$$

Поскольку  $W_0(z) = Y(z) / X(z)$ , то

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] + \dots - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] - a_3 y[n-3] - \dots \quad (2.7)$$

Получили выражение, соответствующее формуле линейной регрессии.

Например, в качестве искомой передаточной функции можно взять

$$W_0(z) = \frac{b_0 + b_1}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + a_3 \cdot z^{-3}} \quad (2.8)$$

В таблице 3 представлены данные для регрессионного анализа.

Таблица 3 – Данные для регрессионного анализа

X[n-1]	X[n]	Y[n-3]	Y[n-2]	Y[n-1]	Y[n]
-	-	-	-	-	-

Регрессионный анализ даст значения коэффициентов следующей модели:

$$Y[n] = A_1 Y[n-1] + A_2 Y[n-2] + A_3 Y[n-3] + A_4 X[n] + A_5 X[n-1]. \quad (2.9)$$

Уравнения вида (2.7) для передаточной функции модели вида (2.8):

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] - a_1 y[n-1] - a_2 y[n-2] - a_3 y[n-3]. \quad (2.10)$$

Сравнивая формулы (2.9) и (2.10), можно определить коэффициенты передаточной функции модели (2.8).

### Пример 2.7. Идентификация объекта по переходной характеристике

По измерениям объекта  $x(t)$ ,  $y(t)$  составим таблицу с данными  $x[n]$ ,  $y[n]$  (таблица 4).

Таблица 4 – Данные переходного процесса

xn	xn-1	yn-1	yn-2	yn-3	yn
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0,02
1	1	0,02	0	0	0,10
1	1	0,10	0,02	0	0,23
1	1	0,23	0,10	0,02	0,38
1	1	0,38	0,23	0,10	0,54
1	1	0,54	0,38	0,23	0,69
1	1	0,69	0,54	0,38	0,83
1	1	0,83	0,69	0,54	0,93
1	1	0,93	0,83	0,69	1,02
1	1	1,02	0,93	0,83	1,07
1	1	1,07	1,02	0,93	1,11
1	1	1,11	1,07	1,02	1,12
1	1	1,12	1,11	1,07	1,12
1	1	1,12	1,12	1,11	1,11
1	1	1,11	1,12	1,12	1,09
1	1	1,09	1,11	1,12	1,07
1	1	1,07	1,09	1,11	1,05
1	1	1,05	1,07	1,09	1,04
1	1	1,04	1,05	1,07	1,02

Выполним с применением Microsoft Excel регрессионный анализ для нахождения зависимости вида:

$$Y[n] = A_1 Y[n-1] + A_2 Y[n-2] + A_3 Y[n-3] + A_4 X[n] + A_5 X[n-1]. \quad (2.11)$$

На рисунке 20 представлены результаты анализа.

ВЫВОД ИТОГОВ												
Регрессионная статистика												
Множественный R	0,999919166											
R-квадрат	0,999838339											
Нормированный R-квадрат	0,999780602											
Стандартная ошибка	0,006040508											
Наблюдения	20											
Дисперсионный анализ												
	<u>df</u>	SS	MS	F	Значимость F							
Регрессия	5	3,159355722	0,631871144	17317,35483	5,13686E-26							
Остаток	14	0,000510828	3,64877E-05									
Итого	19	3,15986655										
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%				
У-пересечение	3,7817E-16	0,006040508	6,26056E-14	1	-0,012955602	0,012955602	0,012955602	0,012955602				
Переменная X 1	0,02	0,008542569	2,341216166	0,03453658	0,001678012	0,038321988	0,001678012	0,038321988				
Переменная X 2	0,052442685	0,009822323	5,339132397	0,000104489	0,031375896	0,073509473	0,031375896	0,073509473				
Переменная X 3	1,69827315	0,126057578	13,47220195	2,08956E-09	1,427906535	1,968639766	1,427906535	1,968639766				
Переменная X 4	-0,805829623	0,22216082	-3,627235553	0,002746043	-1,282317191	-0,329342055	-1,282317191	-0,329342055				
Переменная X 5	0,033959578	0,104562898	0,324776553	0,750152369	-0,190305535	0,25822469	-0,190305535	0,25822469				

Рисунок 20 – Результаты регрессионного анализа

По результатам регрессионного анализа определили коэффициенты уравнения вида (2.5); на рис. 20 эти коэффициенты выделены рамкой. Таким образом, получили коэффициенты уравнения вида (2.10) для расчета  $y[n]$ :

$$y[n] = 0,02 \cdot x[n] + 0,052 \cdot x[n-1] + 1,698 \cdot y[n-1] - 0,806 \cdot y[n-2] + 0,034 \cdot y[n-3].$$

На рисунке 21 приведены графики исходного процесса и модели, рассчитанной по полученному уравнению.

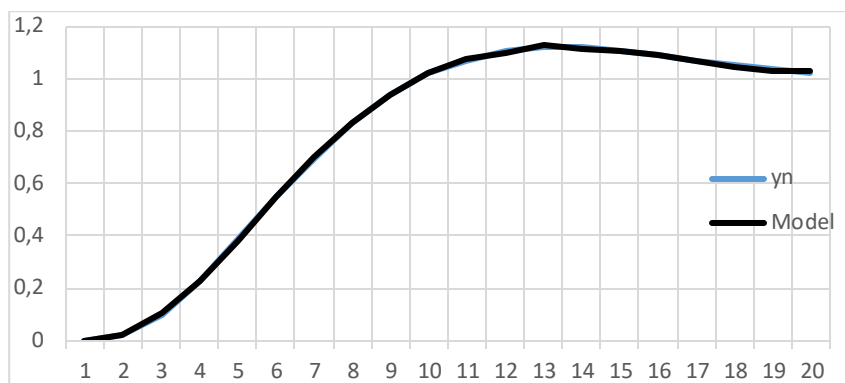


Рисунок 21 – Измеренный выход объекта и рассчитанный по регрессионной модели

### 2.2.2. Пример разработки многофакторной модели

В сложных технологических установках, например в дуговых электросталеплавильной печи (ДСП), на результат работы влияет множество факторов. Количество регистрируемых параметров такого агрегата составляет несколько сотен. Рассмотрим подход к построению модели технологического процесса, базирующийся на функциях корреляционного и регрессионного анализа.

Один из важных показателей работы электросталеплавильной печи – температура расплавленного металла. Выпуск металла из печи должен выполняться при определённой температуре. Измерение температуры расплавленного металла в печи выполняется одноразовыми термопарами; в процессе плавки проводится несколько измерений (обычно 2 – 3 измерения). Этой информации недостаточно для определения оптимального момента



выпуска металла из печи. Рассмотрим некоторые этапы разработки модели, позволяющей непрерывно оценивать температуру металла в печи.

Математическая модель определяется выражением вида:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_iX_i + \dots + A_nX_n \quad (2.12)$$

Задачи нахождения влияющих факторов  $X_i$  математической модели и определения коэффициентов влияния  $A_i$  выполняются с помощью встроенных в Microsoft Excel функций корреляционного и регрессионного анализа.

Корреляционный анализ позволяет установить связь измеренной температуры металла с измеренными параметрами работы ДСП; выборка производится по нескольким десяткам измерений (несколько десятков плавов металла в ДСП). Для регрессионного анализа выбираются параметры, оказывающие наибольшее влияние на температуру. В таблице 5 приведены данные по 18 плавкам металла, включая измеренную температуру стали  $T_{ст. Факт}$ , а также температура  $T_{ст. Расчѐт}$ , рассчитанный по математической модели.

Таблица 5 – Влияющие параметры

Теги	Эн.кВтч	$\int \Sigma$ Газ	Тв.гр-ра	$\int \Sigma$ Тв.П1-20	Тст.Факт	Тст. Расчѐт
№Плавки	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_{факт}$	$Y_{расчѐт}$
572860	10150,0	5365,8	2056,1	11096,7	1544,8	1551,0
572861	8039,3	3859,0	2061,9	7368,4	1525,8	1506,3
572862	13470,8	7174,2	2052,3	13233,3	1519,4	1528,3
572863	26179,1	14936,2	2019,3	28913,2	1668,0	1655,2
572864	16250,3	8840,8	2051,9	16549,1	1552,0	1547,3
572865	14763,4	7837,4	2052,4	14875,7	1540,5	1547,5
572893	11007,4	6304,9	2070,3	12758,4	1538,9	1535,6
573069	11232,1	5464,9	2007,3	9980,1	1558,0	1563,6
573105	12473,	6405,4	2033,8	12269,0	1559,8	1559,1
573106	15525,8	8537,42	2038,9	14878,5	1523,3	1520,2
573110	9250,0	4633,5	2022,3	9211,0	1578,0	1564,8
573122	11796,2	6334,9	2032,7	11509,2	1511,1	1535,3

## Окончание таблицы 5

Теги	Эн.кВтч	$\int \Sigma \text{Газ}$	Тв.тр-ра	$\int \Sigma \text{Тв.П1-20}$	Тст.Факт	Тст.Расчёт
№Плавки	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_{\text{факт}}$	$Y_{\text{расчёт}}$
573125	9279,8	7960,6	2045,1	16297,4	1553,5	1560,0
573145	13534,8	7902,4	2078,2	16933,9	1582,1	1577,9
573150	11417,5	6337,3	2047,7	12539,4	1579,5	1551,8
573151	11720,6	6084,8	2051,4	12338,2	1547,9	1559,8
573152	17275,6	9129,4	2057,8	18908,7	1592,5	1607,5
573153	16129,9	8369,7	2058,3	17192,6	1588,5	1592,4

Условные обозначения:

$X_1$  - расход электроэнергии от реперной точки, кВт·ч;

$X_2$  - расход газа от реперной точки, нм<sup>3</sup>;

$X_3$  - суммарная температура охлаждающей воды трансформатора, °С;

$X_4$  - интегральное значение температуры охлаждающей воды кожухов, °С;

$Y_{\text{факт}}$  - фактическая (замеренная) температуры металла, °С;

$Y_{\text{расчёт}}$  - рассчитанная по модели температуры металла, °С;

Реперная точка – момент полного расплавления металлолома в ДСП; этот момент определяется также на основе математической модели. В таблицах 6, 7 представлены результаты анализа данных.

Таблица 6 – Корреляционный анализ

Параметры	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_{\text{факт}}$
$X_1$	1	-	-	-	-
$X_2$	0,94444015	1	-	-	-
$X_3$	-0,168506244	-0,12927024	1	-	-
$X_4$	0,914490527	0,985049405	-0,037115352	1	-
$Y_{\text{факт}}$	0,680419135	0,687072008	-0,22553405	0,749134056	1

Таблица 7 – Регрессионный анализ

ВЫВОД ИТОГОВ		-	-	-
-	-	-	-	-
<i>Регрессионная статистика</i>			-	-
Множественный R	0,937179372	-	-	-
R-квадрат	0,878305175	-	-	-
Нормированный R-квадрат	0,840860613	-	-	-
Стандартная ошибка	14,54447589	-	-	-
Наблюдения	18	-	-	-
-	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>
Y-пересечение	3561,452523	475,6687643	7,487253295	4,58258E-06
Переменная X 1	0,006244537	0,002686864	2,324098162	0,03696647
Переменная X 2	-0,065537749	0,012175683	-5,38267537	0,000124792
Переменная X 3	-1,017511314	0,231664018	-4,39218537	0,000728067
Переменная X 4	0,033338448	0,005223735	6,382109701	2,41034E-05

Математическая модель адекватная, применима для расчёта прогнозных значений температуры металла первого замера, так как  $R^2=0,88$  (более 0,5); «р-значение» для  $X_1, X_2, X_3, X_4$  менее 0,05.

Математическая модель :

$$Y=3561,4523 + 0,00624X_1 - 0,065538X_2 - 1,01751X_3 + 0,0333384X_4 \quad (2.13)$$

График сходимости фактического значения температуры металла первого замера и расчётного значения приведён на рисунке 22.

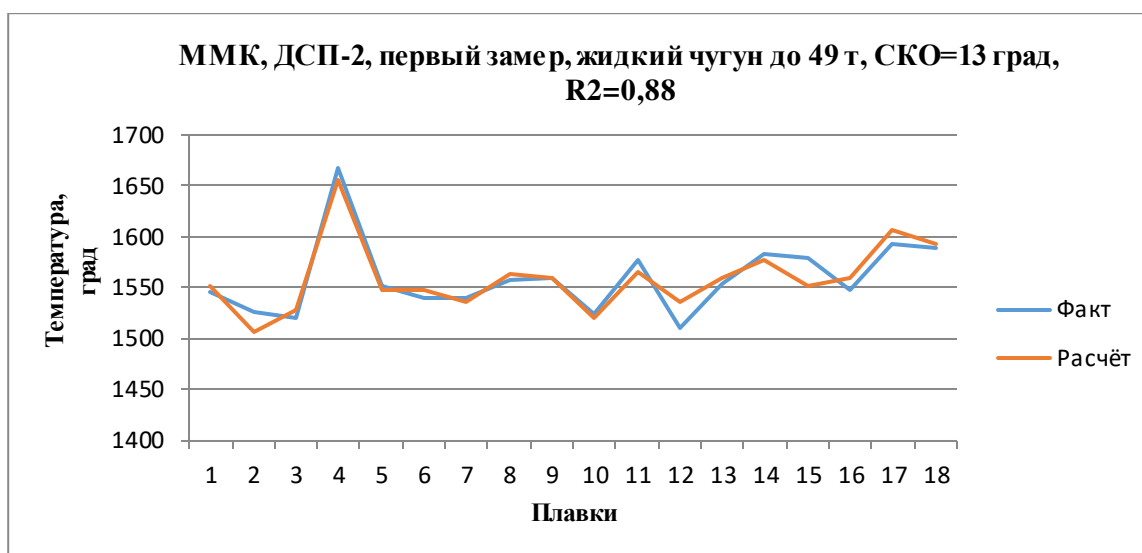


Рисунок 22 – Измеренная и рассчитанная температура металла для 18 плавков

В таблице 8 приведены минутные значения влияющих параметров плавки 572860 от реперной точки до момента первого замера температуры.

Таблица 8 – Расчет температуры металла во время плавки

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	У <sub>факт</sub>	У <sub>расчёт</sub>
0	0	2051,18	0	-	1474,34
1466,05	769,25	2051,44	1531,22	-	1483,87
2967,44	1538,16	2051,77	3094,07	-	1494,61
4398	2307,61	2053,03	4673,05	-	1504,48
5823,36	3075,42	2055,05	6264,57	-	1514,06
7254,66	3841,28	2054,54	7870,08	-	1526,85
8710,86	4604,43	2055,20	9485,69	-	1539,12
10150,04	5365,83	2056,10	11096,75	1544,80	1551,00

Условные обозначения:

X<sub>1</sub> – расход электроэнергии от реперной точки, кВт·ч;

X<sub>2</sub> – расход газа от реперной точки, нм<sup>3</sup>;

X<sub>3</sub> – суммарная температура охлаждающей воды трансформатора, °С;

X<sub>4</sub> – интегральное значение температуры охлаждающей воды кожухов, °С;

У<sub>факт</sub> – фактическая (замеренная) температуры металла первого замера, °С.

На рисунке 23 приведён график изменения температуры металла, рассчитанный по математической модели для плавки 572860.

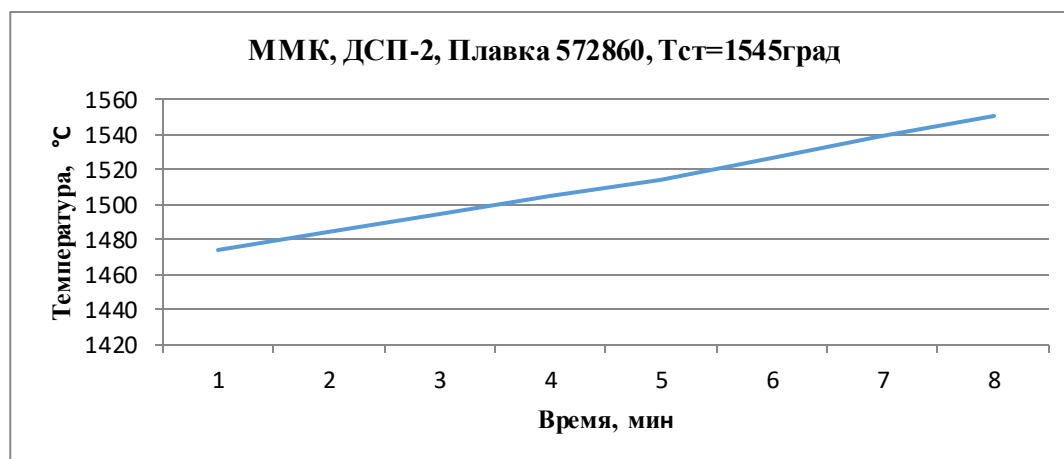


Рисунок 23 – Рассчитанная температура металла в процессе плавки

### **Справка. Оценка адекватности модели**

Значение  $R$  – *квадрат* определяет, с какой степенью точности регрессионное уравнение будет аппроксимировать экспериментальные данные. Если  $R$  – квадрат  $> 0,95$ , то точность аппроксимации высокая. При  $0,8 < R$  – квадрат  $< 0,95$  аппроксимация удовлетворительная. В случае, когда  $R$  – квадрат  $< 0,6$ , точность аппроксимации недостаточна и модель требует улучшения. Чем выше коэффициент детерминации, тем качественнее модель. Хорошо – выше 0,8. Плохо – меньше 0,5.

В столбце  $P$  – *Значение* содержится оценка достоверности отличия соответствующих коэффициентов от нуля. Если  $P > 0,05$ , то коэффициент можно считать нулевым. Это означает, что соответствующая независимая переменная практически не влияет на зависимую переменную.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования: учебное пособие / НГТУ. – Новосибирск, 2005. – 64 с.
  2. Коновалов В.И. Идентификация и диагностика систем: учебное пособие / ТПУ. – Томск, 2010. – 163 с.
  3. Ускевич Т.Г. Методические рекомендации по проведению корреляционно-регрессионного анализа в Microsoft Excel: методические рекомендации /БГЭУ. – Минск, 2010. – 20 с.
-

Евгений Николаевич Ковалев  
Алёна Владимировна Кулапина

# **Автоматизация технологических процессов и производств**

Методы определения параметров  
объектов управления

Методические указания  
к выполнению практических заданий

Редактор и корректор В.А. Басова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2020 г., поз. 125

---

Подп. к печати 15.12. 2020. Формат 60x84/16. Бумага тип №1.

Печать офсетная. 2,5 печ.л.; 2,5 уч.– изд.л. Тираж 30 экз.

Изд.№ 125. Цена «С». Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,  
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.