

**Практикум**

по предмету

«Промышленная автоматизация»

**Подготовил**

**Сергей Чекрыжов**

**Кохтла-Ярве**

**2006**

Методическое пособие содержит варианты практических заданий по предмету «Основы автоматики» для студентов специальности «Технология топлив».

Составитель Чекрыжов С., доц., канд. техн. наук

**Практическая работа 1.**

**Решение дифференциальных уравнений с использованием преобразований Лапласа.**

**Пример Динамика технологического процесса описывается дифференциальным уравнением**



Входной сигнал имеет форму единичного ступенчатого воздействия, т.е. x(t) = 1. Тогда изображение входного сигнала имеет вид X(s) = .

Производим преобразование исходного дифференциального уравнение по Лапласу и подставляем X(s):

s2⋅Y(s) + 5⋅s⋅Y(s) + 6⋅Y(s) = 2⋅s⋅X(s) + 12⋅X(s),

s2⋅Y(s) + 5⋅s⋅Y(s) + 6⋅Y(s) = 2⋅s + 12,

Y(s)⋅(s3 + 5s2 + 6s) = 2⋅s + 12.

Определяется выражение для Y(s):

.

Оригинал полученной функции отсутствует в таблице оригиналов и изображений. Для решения задачи его поиска дробь разбивается на сумму простых дробей с учетом того, что знаменатель может быть представлен в виде s(s + 2)(s + 3):

==-+.

Теперь, используя табличные функции , определяется оригинал выходной функции:

y(t) = 2 - 4.e-2 t + 2.e-3t. ♦

Теперь можно построить график полученной функции с использованием программы.

При решении дифференциальных уравнений с использованием преобразований Лапласа часто встает промежуточная задача разбиения дроби на сумму простых дробей. Существуют два пути решения этой задачи:

- путем решения системы уравнений относительно коэффициентов числителей,

- путем расчета коэффициентов числителей по известным формулам.

Общий алгоритм разбиения дроби на сумму простых дробей:

***шаг 1*** – определяются корни знаменателя si для этого знаменатель дроби приравнивают к нулю и решают полученное уравнение относительно s;

***шаг 2*** – каждому корню ставится в соответствие простая дробь вида , где Мi – неизвестный коэффициент; если имеет место кратный корень с кратностью k, то ему ставится в соответствие k дробей вида ;

***шаг 3*** – определяются коэффициенты Mi по одному из вариантов расчета.

**Первый вариант.** Определение Mi с помощью системы уравнений.

Все дроби приводятся к одному знаменателю, затем путем сравнения коэффициентов при равных степенях s числителя полученной дроби и числителя исходной определяется система из n уравнений, где n – степень знаменателя (количество корней si и коэффициентов Mi). Решение системы относительно Mi дает искомые коэффициенты

**Пример.1.1.** Провести декомпозицию дроби



. В исходной дроби n = 3, поэтому решение уравнения s3 + 5s2 + 6s = 0 дает 3 корня:

s0 = 0, s1 = -2 и s2 = -3, которым соответствуют знаменатели простых дробей вида

s, (s – s1) = (s + 2) и (s – s2) = (s + 3).

Исходная дробь декомпозируется на три дроби:

==++.

Далее дроби приводятся к общему знаменателю:

= .

Сравнивая получившуюся дробь с исходной, можно составить систему из трех уравнений с тремя неизвестными (при 2-й степени s в исходной дроби стоит 0, при 1-й стоит 2, свободный член равен 12):

*М0 + М1 + М2 = 0 M0 = 2*

*5.М0 + 3.М1 + 2.М2 = 2 🡪 M1 = -4*

*6.М0 = 12 M2 = 2*

Следовательно, дробь можно представить как сумму трех дробей:

=-+.♦

Решение этой задачи легко решается с помощью программы Laplas пакета TAU20 . Для решения задачи по исходному дифференциальному уравнению необходимо получить передаточную функцию и ввести в качестве исходных данных коэффициенты числитель и знаменателя передаточной функции.

**Задачи для домашней работы № 1**

**Задание № 1**

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а)  .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 2***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а)  .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 3***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 4***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 5***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 6***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 7***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 9***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 10***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 11***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а)  .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 12***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 13***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 14***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) ; .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 15***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 16***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 17***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 18***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 19***

1. По заданному дифференциальному уравнению найти решение при нулевых начальных условиях и единичном воздействии, передаточную функцию.

Оценить устойчивость.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

***Задание № 20***

1. По заданным дифференциальным уравнениям определить операторные уравнения при нулевых начальных условиях, передаточные функции, структурные схемы звеньев, характеристические уравнения и их корни.

Показать распределение корней на комплексной плоскости.

Оценить устойчивость каждого из звеньев.

а) .

2. По заданной передаточной функции записать дифференциальное уравнение:

.

**Практическая работа 2**

**2.1 Виды соединений динамических звеньев**

В целях упрощения анализа исследуемый объект разбивают на звенья и после определения передаточных функций для каждого звена объединяют их в одну передаточную функцию объекта. Вид передаточной функции объекта зависит от вида соединения звеньев:

*1) Последовательное соединение.*

Wоб = W1.W2.W3…

W1

W2

W3

х

у

Рисунок 1.

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции **перемножаются**.

*2) Параллельное соединение.*

Wоб = W1 + W2 + W3 + …

W1

W2

W3

х

у

Рисунок 2

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции **складываются.**

*3) Обратная связь*

W1

W2

х

у

Рисунок 3

Передаточная функция по заданию (х):



«+» соответствует отрицательной ОС,

«-» - положительной.

Для определения передаточных функций объектов, имеющих более сложные соединения звеньев, используют последовательное укрупнение схемы

**2.2 Передаточные функции АСР**

Для исследования и расчета структурную схему АСР путем эквивалентных преобразований приводят к простейшему стандартному виду «объект - регулятор» (см. рисунок 4).

Wp

Wy

x

e

u

y

f

Рисунок 4

В общем случае любая одномерная АСР с главной обратной связью путем постепенного укрупнения звеньев может быть приведена к такому виду.

Если выход системы у не подавать на ее вход, то получается разомкнутая система регулирования, передаточная функция которой определяется как произведение:

W∞ = Wp.Wy

(Wp - ПФ регулятора, Wy - ПФ объекта управления).

То есть последовательность звеньев Wpи Wy может быть заменена одним звеном с W∞. Передаточную функцию замкнутой системы принято обозначать как Ф(s). Она может быть выражена через W∞:

у

х

W∞

Рисунок 5



(далее будем рассматривать только системы с обратной отрицательной связью, поскольку они используются в подавляющем большинстве АСР).

Данная передаточная функция Фз(s) определяет зависимость у от х и называется передаточной функцией замкнутой системы по каналу задающего воздействия (по заданию).

Для АСР существуют также передаточные функции по другим каналам:

 по ошибке,

=  - по возмущению,

где Wу.в.(s) – передаточная функция объекта управления по каналу передачи возмущающего воздействия.

В отношении учета возмущения возможны два варианта:

- возмущение оказывает аддитивное влияние на управляющее воздействие (см. рисунок 1.6,а);

- возмущение влияет на измерения регулируемого параметра (см. рисунок 1.6,б).

Примером первого варианта может быть влияние колебаний напряжения в сети на напряжение, подаваемое регулятором на нагревательный элемент объекта. Пример второго варианта: погрешности при измерениях регулируемого параметра вследствие изменения температуры окружающей среды. Wу.в. – модель влияния окружающей среды на измерения.

Wp

Wy

x

e

u

y

f

а)

Wp

Wy

x

e

u

y

f

Wy.в.

б)

Рисунок 6

Для первого варианта передаточная функция Wу.в. принимается равной Wу, для второго – как правило, на схеме она выделена в отдельное звено.

Поскольку передаточная функция разомкнутой системы является в общем случае дробно-рациональной функцией вида W∞ = , то передаточные функции замкнутой системы могут быть преобразованы:

Wз(s) = = =, We(s) == =,

где D = A + B.

Как видно, эти передаточные функции отличаются только выражениями числителей. Выражение знаменателя называется **характеристическим выражением замкнутой системы** и обозначается как Dз(s) = A(s) + B(s), в то время как выражение, находящееся в знаменателе передаточной функции разомкнутой системы W∞, называется **характеристическим выражением разомкнутой системы** А(s).

**Пример 2.1**  Определение передаточных функций АСР.

Структура АСР представлена на рисунке 7. Требуется определить передаточные функции регулятора, объекта, разомкнутой системы, замкнутой системы и характеристические выражения.



K1

K2⋅s



x

u

y

e

1

2

3

4



5

Объект управления

Регулятор

Рисунок 7

Параметры K0 = 1, K1 = 3, K2 = 1,5, K4 = 2, K5 = 0,5.

В структурной схеме АСР звенья, соответствующие регулирующему устройству, стоят перед звеньями объекта управления и генерируют управляющее воздействие на объект u. По схеме видно, что к схеме регулятора относятся звенья 1, 2 и 3, а к схеме объекта – звенья 4 и 5.

Учитывая, что звенья 1, 2 и 3 соединены параллельно, получаем передаточную функцию регулятора как сумму передаточных функций звеньев:

.

Звенья 4 и 5 соединены последовательно, поэтому передаточная функция объекта управления определяется как произведение передаточных функций звеньев:

.

Передаточная функция разомкнутой системы:

,

откуда видно, что числитель В(s) = 1,5.s2 + 3.s + 1, знаменатель (он же характеристический полином разомкнутой системы) А(s) = 2.s3 + 3.s2 + s. Тогда характеристический полином замкнутой системы равен:

D(s) = A(s) + B(s) = 2.s3 + 3.s2 + s + 1,5.s2 + 3.s + 1 = 2.s3 + 4,5.s2 + 4.s + 1.

Передаточные функции замкнутой системы:

по заданию ,

по ошибке .

При определении передаточной функции по возмущению принимается Wу.в. = Wоу. Тогда



**Задачи для домашней работы № 2**

Дана одноконтурная АСР, для которой известна передаточная функция регулятора (R) с настройками и дифференциальное уравнение объекта управления (О).

Требуется определить:

* передаточную функцию разомкнутой системы W∞(s),
* характеристическое выражение замкнутой системы (ХВЗС),
* передаточные функции замкнутой системы
  + Фз(s) – по заданию,
  + Фв(s) – по возмущению,
  + ФЕ(s) – по ошибке,
* коэффициенты усиления АСР.

***Задание № 1***

1. Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



1. О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 2***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 3***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 4***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 5***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 6***

Регулятор - R c П- законом регулирования и передаточной функцией вида

Wp =0,5.

О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 7***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 8***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида

.

О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 9***

Регулятор - R c И- законом регулирования и передаточной функцией вида

.

О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 10***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 11***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 12***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 13***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида

.

О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 14***

Регулятор - R c И- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 15***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 16***

Регулятор - R c П- законом регулирования и передаточной функцией вида

Wp = 2.

О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 17***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



ОУ - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 18***

Регулятор - R c И- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 19***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



***Задание № 20***

Регулятор - R c ПИ- законом регулирования и передаточной функцией вида



О - объект управления, описываемый дифференциальным уравнением



**Практическая работа 3**

**3.1 Идентификация параметров передаточной функции объекта по переходной кривой**

Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных переходного процесса, называется **идентификацией** объекта.

Предположим, что при подаче на вход объекта ступенчатого воздействия была получена переходная характеристика ( рис 1). Требуется определить вид и параметры передаточной функции.

у

ууст

t

T

τ

τд

Рис 1

Зделаем допущение, что передаточная функция по данному каналу имеет вид



, то есть объкт можно описать в первом приближении как последовательно включенные звено запаздывания и инерционное звено первого порядка.

Параметры передаточной функции: К - коэффициент усиления, Т - постоянная времени, τ - запаздывание.

**Коэффициентом усиления** называется величина, показывающая, во сколько раз данное звено усиливает входной сигнал (в установившемся режиме), и равная отношению выходной величины у в установившемся режиме ко входной величине х:

,

**Установившееся значение выходной величины** ууст - это значение у при t → ∞.

**Запаздыванием** τ называется промежуток времени от момента изменения входной величины х до начала изменения выходной величины у.

**Постоянная времени** – период времени , за который объект придёт в новое установившееся состояние, при условии если скорость переходного процесса была бы максимальной. Для рассматриваемой передаточной функции 1-го порядка Т определяется наиболее просто: сначала проводится касательная к точке перегиба, затем находятся точки пересечения с осью времени и асимптотой yуст; время Т определяется как интервал времени между этими точками.

В случае, если на графике между точкой перегиба имеется вогнутость, определяется дополнительное переходное запаздывание τдоп, которое прибавляется к основному: τ = τ + τдоп.

**3.2 Определение параметров настройки регуляторов**

Регулятор, включенный в замкнутую САР, может иметь несколько параметров настроек, каждая из которых может изменяться в достаточно широких пределах. При этом при определенных значениях настроек САР будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию.

Поэтому стоит задача синтеза САР сводится , во-первых, к определению параметров настройки регулятора, которые обеспечивают устойчивость замкнутой системы, и, во-вторых, выбрать из нихтакие, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества переходного процесса . Требования к показателям качества регулирования устанавливаются, исходя из технологических требований . Чаще всего накладываются требования на время регулирования (минимум) и степень затухания (Ψ ≥ Ψзад).

**Формульный метод** определения настроек регуляторов используется для быстрой и приближенной оценки значений настроек регуляторов.

Если объект управления представляет собой инерционное звено с запаздыванием, то есть описывается передаточной функцией (рис.2)

,

где K – коэффициент усиления, Т - постоянная времени, τ - запаздывание , то настройки P-, I-, PI- и PID-регуляторов могут быть определены по приведенным в таблице 1. формулам в зависимости от того, какой вид переходного процесса требуется получить.



K1

K2⋅s



x

u

y

e



Объект управления

Регулятор

Рис 2.

Во второй колонке таблицы приведены формулы для получения переходного апериодического процесса без перерегулирования, в третьей – с 20 %, перерегулированием, в четвертой – для процесса с минимальным временем регулирования , то есть с максимальным быстродействием при этом процесс может быть сильно колебательным.

Таблица 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Регулятор | Апериодический процесс | Процесс с перерегулированием 20 % | Процесс с минимальным временем регулирования |
| P |  |  |  |
| I |  |  |  |
| PI | , | , | , |
| PID | ,  , | ,  , | ,  , |

***Работа выполняется с помощью программы Process пакета TAU20. В качестве исходных данных вводитятся коэффициенты передаточной функции регулятора и объекта, запаздывание.***

***Задания***

***Практическая работа № 3***

По табличным данным построить

* переходную кривую объекта,
* определить параметры передаточной функции объекта,
* рассчитать настройки PID -регулятора, обеспечивающие 20%-е перерегулирование.
* Рассчитать переходный процесс в замкнутой системе регулирования с полученными параметрами настройки регулятора и оценить качество переходного процееса

***Вариант № 1***

ΔX = 15 кПа; ΔY = 24 °С; τ = 1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| **ΔY** | 0,0 | 4,4 | 8,8 | 12,8 | 16,0 | 18,8 | 21,0 | 22,2 | 23,8 | 24,0 |

***Вариант № 2***

ΔXвх = 15 кПа; ΔY = 150 °С; τзап = 0,15 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0,00 | 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 2,00 | 2,25 | 2,50 | 2,75 | 3,00 |
| **ΔY** | 0 | 9 | 20 | 34 | 52 | 79 | 108 | 124 | 136 | 143 | 148 | 149,7 | 150 |

***Вариант № 3***

ΔXвх = 90 м3/час; ΔY = 45 °С; τзап = 0,1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| **ΔY** | 0,0 | 5,5 | 16,0 | 25,5 | 31,5 | 35,0 | 38,0 | 40,0 | 41,7 | 43,0 | 43,8 | 44,5 | 45,0 |

***Вариант № 4***

ΔXвх = 25 кПа; ΔY = 8 °С; τзап = 1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| **ΔY** | 0,00 | 0,10 | 1,30 | 2,75 | 3,90 | 4,90 | 5,70 | 6,30 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| **ΔY** | 6,70 | 7,20 | 7,50 | 7,70 | 7,85 | 7,95 | 8,00 | 8,00 |

***Вариант № 5***

ΔXвх = 0,5 кг/см2; ΔY = 36 °С; τзап = 1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| **ΔY** | 0 | 4,0 | 8,3 | 12,8 | 16,5 | 19,2 | 21,3 | 23,3 | 25,0 | 27,0 | 28,5 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| **ΔY** | 30,0 | 30,8 | 31,7 | 32,4 | 33,0 | 33,6 | 34,1 | 34,7 | 35,0 | 35,5 | 36,0 |

## Вариант № 6

ΔXвх = 10 кПа; ΔY = 7 °С; τзап = 0,35 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| **ΔY** | 0,3 | 1,1 | 2,4 | 3,6 | 4,45 | 5,1 | 5,7 | 6,2 | 6,5 | 6,75 | 6,9 | 7,0 |

***Вариант № 7***

ΔXвх = 25 кПа; ΔY = 7,5 °С; τзап = 0,5 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 0,5 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| **ΔY** | 0 | 0 | 0,3 | 0,9 | 2,3 | 4 | 4,9 | 5,6 | 6,1 |

***Вариант № 8***

ΔXвх = 4 кПа; ΔY = 0,138 %; τзап = 34 сек

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 |
| **ΔY** | 1,261 | 1,26 | 1,269 | 1,291 | 1,315 | 1,338 | 1,357 | 1,368 | 1,376 | 1,380 | 1,380 |

***Вариант № 9***

ΔXвх = 5,5 кПа; ΔY = 0,149 %; τзап = 40 сек

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 20 | 50 | 80 | 110 | 140 | 170 | 200 | 230 | 260 |
| **ΔY** | 0 | 0,009 | 0,032 | 0,060 | 0,089 | 0,116 | 0,130 | 0,141 | 0,149 | 0,149 |

***Вариант № 10***

ΔXвх = 20 кПа; ΔY = 23 °С; τзап = 0,5 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **ΔY** | 0 | 0,6 | 1,8 | 3,6 | 5,8 | 8,2 | 11,2 | 14 | 16,4 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **t, мин** | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |  |
| **ΔY** | 18,2 | 20,2 | 21,4 | 22 | 22,4 | 22,6 | 22,8 | 23 |  |

***Вариант № 11***

ΔXвх = 20 кПа; τзап = 0,5 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **ΔY** | 0 | 0,3 | 1,0 | 2,3 | 4,7 | 8,4 | 13,2 | 19,3 | 25,7 |

***Вариант № 12***

ΔXвх = 20 кПа; ΔY = 30 °С; τзап = 1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| **ΔY** | 0 | 2 | 5 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 | 25 | 27 | 30 | 30 | 30 |

***Вариант № 13***

ΔXвх = 10 кПа; τзап = 0,5 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **ΔY** | 0 | 0,15 | 0,5 | 1,15 | 2,35 | 4,2 | 6,6 | 9,65 | 12,9 |

***Вариант № 14***

ΔXвх = 30 кПа; ΔY = 7,0 °С; τзап = 0,2 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
| **ΔY** | 0 | 0,42 | 1,33 | 2,31 | 3,43 | 4,55 | 5,46 | 6,02 | 6,44 | 6,72 | 6,86 | 7,00 |

***Вариант № 15***

ΔXвх = 25 кПа; ΔY = 50 °С; τзап = 2 мин 45 сек

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| **ΔY** | 0 | 1 | 5 | 13 | 21 | 30 | 36 | 41 | 45 | 48 | 49 | 50 | 50 |

***Вариант № 16***

ΔXвх = 8 кПа; ΔY = 6 °С; τзап = 2 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| **ΔY** | 0 | 0,3 | 0,9 | 2 | 3,2 | 3,9 | 4,4 | 4,8 | 5,1 | 5,3 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **t, мин** | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| **ΔY** | 5,5 | 5,7 | 5,8 | 5,85 | 5,9 | 5,93 | 5,97 | 5,99 | 6 | 6 |

***Вариант № 17***

ΔXвх = 15 кПа; ΔY = 3,8 т/час; τзап = 3 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 9 | 15 | 21 | 27 | 33 | 39 | 45 | 51 | 57 | 63 | 69 | 75 | 78 |
| **ΔY** | 0 | 0,65 | 2,23 | 2,85 | 3,2 | 3,4 | 3,53 | 3,62 | 3,67 | 3,72 | 3,75 | 3,77 | 3,79 | 3,8 |

***Вариант № 18***

ΔXвх = 20 кПа; ΔY = 22,6 °С; τзап = 30 сек

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| **ΔY** | 0 | 2,2 | 6 | 9,2 | 11,6 | 13,8 | 15,7 | 17,5 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **t, мин** | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |  |
| **ΔY** | 19,1 | 20,4 | 21,3 | 21,9 | 22,3 | 22,5 | 22,6 |  |

***Вариант № 19***

ΔXвх = 10 кПа; ΔY = 5,5 °С; τзап = 0,55 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| **ΔY** | 0 | 0,133 | 0,7 | 2,2 | 3,733 | 4,62 | 5,0 | 5,23 | 5,34 | 5,4 | 5,43 | 5,47 | 5,5 |

***Вариант № 20***

ΔXвх = 30 кПа; ΔY = 6,5 °С; τзап = 1 мин

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, мин** | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| **ΔY** | 0 | 0,5 | 1,6 | 3,0 | 4,3 | 5,2 | 5,6 | 6,0 | 6,2 | 6,35 | 6,45 | 6,5 |

Литература

1.

[**http://twt.mpei.ac.ru/MAS/Worksheets/Rotach/index.html**](http://twt.mpei.ac.ru/MAS/Worksheets/Rotach/index.html)