

# Математика

## Часть 2

УГТУ-УПИ

2007 г.

1.

## Решение НЛДУ второго порядка с постоянными коэффициентами методом неопределённых коэффициентов.

Для НЛДУ с постоянными коэффициентами существует более простой метод нахождения частного решения  $\check{y}$ , чем метод вариации произвольных постоянных.

Частное решение НЛДУ зависит от вида правой части уравнения  $y'' + a_1 y' + a_2 y = f(x)$ .

1. Если  $f(x) = P_n(x)e^{\alpha x}$

где  $P_n(x)$  – многочлен  $n$ -го порядка.

Возможны следующие случаи:

1)  $\alpha$  не является корнем характеристического уравнения  $k^2 + a_1k + a_2 = 0$ ,

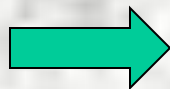
частное решение  $\tilde{y}$  ищем в виде:

$$\tilde{y} = Q_n(x)e^{\alpha x} = (A_0x^n + A_1x^{n-1} + \dots + A_n)e^{\alpha x}.$$

$$\tilde{y}' = Q_n'(x)e^{\alpha x} + Q_n(x)\alpha e^{\alpha x},$$

$$\tilde{y}'' = Q_n''(x)e^{\alpha x} + Q_n'(x)\alpha e^{\alpha x} +$$

$$+ Q_n'(x)\alpha e^{\alpha x} + Q_n(x)\alpha^2 e^{\alpha x},$$



$$\begin{aligned}
& Q_n''(x) + 2Q_n'(x)\alpha + Q_n(x)\alpha^2 + a_1Q_n'(x) + \\
& + a_1Q_n(x)\alpha + a_2Q_n(x) = P_n(x) \\
& Q_n''(x) + Q_n'(x)(2\alpha + a_1) + \\
& + Q_n(x)(\alpha^2 + a_1\alpha + a_2) = P_n(x) \quad (*)
\end{aligned}$$

Слева и справа от знака равенства –  
многочлены степени  $n$   $(P_n(x), Q_n(x))$   
Приравнивая коэффициенты при одинаковых  
степенях  $x$ , получим систему  $(n+1)$  уравнений  
для определения коэффициентов

$$A_0, A_1, \dots, A_n.$$

*Пример .*

Найти общее решение НЛДУ

$$y'' - 5y' + 6y = e^x .$$

*Решение.*

Для ОЛДУ  $k^2 - 5k + 6 = 0,$

$$k_1 = 3, \quad k_2 = 2, \quad y_0 = c_1 e^{3x} + c_2 e^{2x} .$$


Для  $f(x) = e^x \quad \alpha = 1.$

Так как  $k_1, k_2 \neq \alpha \rightarrow \tilde{y} = Ae^x$

Найдем  $A$ .  $\tilde{y}' = Ae^x$ ,  $\tilde{y}'' = Ae^x$ .

Подставим в уравнение:


$$Ae^x - 5Ae^x + 6Ae^x = e^x, \quad 2A = 1, \quad A = \frac{1}{2}$$

  $\tilde{y} = \frac{1}{2}e^x$

Общее решение НЛДУ:  $y = y_0 + \tilde{y}$

$$y = c_1 e^{3x} + c_2 e^{2x} + \frac{1}{2} e^x.$$

2)  $\alpha$  - простой (однократный) корень характеристического уравнения.

Частное решение искать в форме  $\tilde{y} = Q_n(x)e^{\alpha x}$  нельзя, т.к. в равенстве (\*)  $\alpha^2 + a_1\alpha + a_2 = 0$ . Слева от знака равенства – многочлен степени  $n-1$ , справа – степени  $n$  

Тождество не получается ни при каких

$$A_0, A_1, \dots, A_n$$


Частное решение  $\tilde{y}$  ищем в виде:

$$\tilde{y} = xQ_n(x)e^{\alpha x}$$

3)  $\alpha$  - двукратный корень характеристического уравнения.

Частное решение искать в форме  $\tilde{y} = Q_n(x)e^{\alpha x}$  нельзя, т.к. в равенстве (\*)

$$\alpha^2 + a_1\alpha + a_2 = 0, \quad 2\alpha + a_1 = 0$$

Слева от знака равенства – многочлен степени  $n - 2$ , справа – степени  $n$  

Чтобы получить тождество многочленов,

частное решение  $\tilde{y}$  ищем в виде:

$$\tilde{y} = x^2 Q_n(x)e^{\alpha x}$$



**Пример .**

Найти общее решение НЛДУ

$$y'' - 8y' + 16y = e^{4x}.$$

**Решение.**

Для ОЛДУ  $k^2 - 8k + 16 = 0,$

$$k_1 = 4, \quad k_2 = 4, \quad y_0 = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x}.$$

Для  $f(x) = e^{4x} \quad \alpha = 4.$

Так как  $k_1 = k_2 = \alpha = 4$



$$\tilde{y} = x^2 A e^{4x}$$

Найдем А.

$$\tilde{y}' = 2xAe^{4x} + x^2 A4e^{4x} = e^{4x} (2Ax + 4Ax^2),$$

$$\tilde{y}'' = 4e^{4x} (2Ax + 4Ax^2) + e^{4x} (2A + 8Ax) =$$

$$= e^{4x} (8Ax + 16Ax^2 + 2A + 8Ax) =$$

$$= e^{4x} (16Ax^2 + 16Ax + 2A),$$

$$e^{4x} (16Ax^2 + 16Ax + 2A) - 8e^{4x} (2Ax + 4Ax^2) +$$

$$+ 16x^2 Ae^{4x} = e^{4x},$$

$$\cancel{16Ax^2} + \cancel{16Ax} + 2A - \cancel{16Ax} - \cancel{32Ax^2} + \cancel{16Ax^2} = 1$$

$$2A = 1, \quad A = \frac{1}{2} \quad \longrightarrow \quad \tilde{y} = \frac{1}{2} x^2 e^{4x}$$

$$y = c_1 e^{4x} + c_2 x e^{4x} + \frac{1}{2} x^2 e^{4x} .$$

## 2. Если

$$f(x) = P_n(x)e^{\alpha x} \cos \beta x + Q_m(x)e^{\alpha x} \sin \beta x$$

где  $P_n(x), Q_m(x)$  – многочлены.

Возможны следующие случаи:

1) если  $\alpha + i\beta$  не является корнем характеристического уравнения, то

$$\tilde{y} = U_p(x)e^{\alpha x} \cos \beta x + V_p(x)e^{\alpha x} \sin \beta x$$

где  $U_p(x), V_p(x)$  – многочлены,

степень которых равна наивысшей степени многочленов  $P_n(x), Q_m(x)$ ,  $p = \max(m, n)$ .

2) если  $\alpha + i\beta$  является корнем характеристического уравнения, то

$$\tilde{y} = x \cdot \left( U_p(x) e^{\alpha x} \cos \beta x + V_p(x) e^{\alpha x} \sin \beta x \right)$$

*Замечание.*

Вид частного решения сохраняется в случае, когда один из многочленов  $P_n(x), Q_m(x)$  равен нулю.

**Пример .**

Найти общее решение НЛДУ

$$y'' - 4y' + 4y = \cos x.$$

**Решение.**

Для ОЛДУ  $k^2 - 4k + 4 = 0,$

$$k_1 = 2, \quad k_2 = 2, \quad y_0 = c_1 e^{2x} + c_2 x e^{2x}.$$

Для  $f(x) = \cos x \quad \alpha + i\beta = 0 + i1.$

Так как  $k_{1,2} = 2 \neq i$



$$\tilde{y} = A \cos x + B \sin x$$

Найдем  $A$  и  $B$ .

$$\tilde{y}' = -A \sin x + B \cos x,$$

$$\tilde{y}'' = -A \cos x - B \sin x,$$

$$-A \cos x - B \sin x - 4(-A \sin x + B \cos x) + 4(A \cos x + B \sin x) = \cos x$$

$$(-A - 4B + 4A) \cos x + (-B + 4A + 4B) \sin x = \cos x$$

$$\begin{cases} 3A - 4B = 1, \\ 4A + 3B = 0 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad A = \frac{3}{25}, B = -\frac{4}{25}$$

$$\tilde{y} = \frac{3}{25} \cos x - \frac{4}{25} \sin x,$$

$$y = c_1 e^{2x} + c_2 x e^{2x} + \frac{3}{25} \cos x - \frac{4}{25} \sin x.$$



**Пример .**

Найти общее решение НЛДУ

$$y'' + y = 3 \sin x.$$

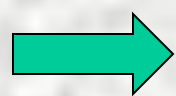
**Решение.**

Для ОЛДУ  $k^2 + 1 = 0,$

$$k_{1,2} = \pm i, \quad y_0 = c_1 \cos x + c_2 \sin x$$

Для  $f(x) = 3 \sin x$   $\alpha + i\beta = 0 + i1.$

Так как  $k_{1,2} = \pm i$  совпадает с  $\alpha + i\beta = i$



$$\checkmark y = x(A \cos x + B \sin x)$$

Найдем  $A$  и  $B$ .

$$\begin{aligned}\tilde{y}' &= A \cos x + B \sin x - xA \sin x + xB \cos x = \\ &= (A + Bx) \cos x + (B - Ax) \sin x,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{y}'' &= B \cos x + (A + Bx) \sin x - \\ &\quad - A \sin x + (B - Ax) \cos x = \\ &= (B + B - Ax) \cos x - (A + Bx + A) \sin x, \\ &\quad (2B - Ax) \cos x - (2A + Bx) \sin x + \\ &\quad + Ax \cos x + Bx \sin x = 3 \sin x,\end{aligned}$$

$$2B \cos x - 2A \sin x = 3 \sin x.$$

$$\begin{cases} -2A = 3, \\ 2B = 0 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad A = -\frac{3}{2}, B = 0$$

$$y = -\frac{3}{2} x \cos x$$

$$y = c_1 \cos x + c_2 \sin x - \frac{3}{2} x \cos x.$$

**Т.**

## Принцип суперпозиции решений.

Пусть  $y'' + a_1 y' + a_2 y = f_1(x) + f_2(x)$ ,

$\tilde{y}_1$  - частное решение  $y'' + a_1 y' + a_2 y = f_1(x)$ ,

$\tilde{y}_2$  - частное решение  $y'' + a_1 y' + a_2 y = f_2(x)$ ,

тогда частное решение НЛДУ равно сумме  
этих двух решений  $\tilde{y} = \tilde{y}_1 + \tilde{y}_2$

## 2. Решение НЛДУ высших порядков .

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_n y = f(x),$$

где  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $f(x)$  –

непрерывные функции или постоянные.

Пусть общее решение соответствующего однородного уравнения

$$y_0 = c_1 y_1 + c_2 y_2 + \dots + c_n y_n$$

# Т. Метод вариации произвольных постоянных

Частное решение НЛДУ ищется в виде:

$$\tilde{y} = c_1(x)y_1 + c_2(x)y_2 + \dots + c_n(x)y_n$$

где  $c_1(x), c_2(x), \dots, c_n(x)$  – функции, определяемые из системы уравнений

$$\begin{cases} c'_1 y_1 + c'_2 y_2 + \dots + c'_n y_n = 0, \\ c'_1 y'_1 + c'_2 y'_2 + \dots + c'_n y'_n = 0, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ c'_1 y_1^{(n-1)} + c'_2 y_2^{(n-1)} + \dots + c'_n y_n^{(n-1)} = f(x) \end{cases}$$

# Метод неопределенных коэффициентов

1. Если

$$f(x) = P_n(x)e^{\alpha x}$$

возможны следующие случаи:

1)  $\alpha$  не является корнем характеристического уравнения.

Частное решение  $\tilde{y}$  ищем в виде:

$$\tilde{y} = Q_n(x)e^{\alpha x} = (A_0x^n + A_1x^{n-1} + \dots + A_n)e^{\alpha x}.$$

2)  $\alpha$  - корень характеристического уравнения кратности  $m$  .

Частное решение  $\tilde{y}$  ищем в виде:

$$\tilde{y} = x^m Q_n(x) e^{\alpha x}$$



**Пример .**

Найти общее решение НЛДУ

$$y^{(4)} - y = x^3 + 1.$$

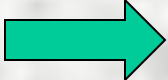
**Решение.**

Для ОЛДУ  $k^4 - 1 = 0,$

$$k_1 = 1, \quad k_2 = -1, \quad k_3 = i, \quad k_4 = -i,$$

$$y_0 = c_1 e^x + c_2 e^{-x} + c_3 \cos x + c_4 \sin x.$$

Для  $f(x) = x^3 + 1 \quad \alpha = 0 \neq k_1, k_2, k_3, k_4.$

  $\tilde{y} = Q_3(x) e^{0x} = A_0 x^3 + A_1 x^2 + A_2 x + A_3.$

Найдем  $A_0, A_1, A_2, A_3$ .

$$\tilde{y}' = 3A_0x^2 + 2A_1x + A_2,$$

$$\tilde{y}'' = 6A_0x + 2A_1, \quad \tilde{y}''' = 6A_0, \quad \tilde{y}^{(4)} = 0,$$

$$-A_0x^3 - A_1x^2 - A_2x - A_3 = x^3 + 1.$$

Приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях  $x$  :

$$\begin{cases} -A_0 = 1, \\ A_1 = 0, \\ A_2 = 0, \\ A_3 = -1 \end{cases}$$



$$\tilde{y} = -x^3 - 1.$$

$$y = c_1 e^x + c_2 e^{-x} + c_3 \cos x + c_4 \sin x - x^3 - 1.$$

## 2. Если

$$f(x) = P_n(x)e^{\alpha x} \cos \beta x + Q_m(x)e^{\alpha x} \sin \beta x$$

Возможны следующие случаи:

1) если  $\alpha + i\beta$  не является корнем характеристического уравнения, то

$$\tilde{y} = U_p(x)e^{\alpha x} \cos \beta x + V_p(x)e^{\alpha x} \sin \beta x$$

где  $U_p(x), V_p(x)$  – многочлены,

степень которых равна наивысшей степени

многочленов  $P_n(x), Q_m(x)$ ,  $p = \max(m, n)$ .

2) если  $\alpha + i\beta$  является корнем  
характеристического уравнения кратности  $m$ ,  
то

$$\tilde{y} = x^m \left( U_p(x) e^{\alpha x} \cos \beta x + V_p(x) e^{\alpha x} \sin \beta x \right)$$

**Пример .**

Найти общее решение НЛДУ

$$y^{(4)} - y = 6 \sin x.$$

**Решение.**

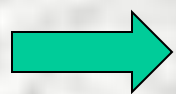
Для ОЛДУ  $k^4 - 1 = 0,$

$$k_1 = 1, \quad k_2 = -1, \quad k_3 = i, \quad k_4 = -i,$$

$$y_0 = c_1 e^x + c_2 e^{-x} + c_3 \cos x + c_4 \sin x.$$

Для  $f(x) = 6 \sin x \quad \alpha = 0, \beta = 1.$

$\alpha + i\beta = i$  совпадает с корнем  $k_3 = i$



$$\tilde{y} = x(A \cos x + B \sin x)$$

Найдем  $A$  и  $B$ .

$$\tilde{y}' = (A + Bx)\cos x + (B - Ax)\sin x,$$

$$\tilde{y}'' = (B + B - Ax)\cos x - (A + Bx + A)\sin x,$$

$$\tilde{y}''' = (-3A - Bx)\cos x - (3B - Ax)\sin x,$$

$$\tilde{y}^{(4)} = (-4B + Ax)\cos x + (4A + Bx)\sin x,$$

$$(-4B + Ax)\cos x + (4A + Bx)\sin x -$$

$$-Ax\cos x - Bx\sin x = 6\sin x,$$

$$-4B \cos x + 4A \sin x = 6 \sin x.$$

$$\begin{cases} 4A = 6, \\ -4B = 0 \end{cases} \quad \longrightarrow \quad A = \frac{3}{2}, B = 0$$

$$y = \frac{3}{2} x \cos x$$

$$y = c_1 e^x + c_2 e^{-x} + c_3 \cos x + c_4 \sin x + \frac{3}{2} x \cos x.$$



### 3. Системы линейных уравнений.

*Определение.*

$$(1) \quad \begin{cases} y_1^{(p_1)} = f_1(x, y_1, \dots, y_n^{(p_1-1)}), \\ y_2^{(p_2)} = f_2(x, y_2, \dots, y_n^{(p_2-1)}), \\ y_n^{(p_n)} = f_n(x, y_1, \dots, y_n^{(p_n-1)}) \end{cases}$$

Система ДУ (1) называется *канонической* порядка  $n$ , где  $n = p_1 + p_2 + \dots + p_n$ .

## Определение.

Если  $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1$ , то система (1) называется **нормальной**. Она имеет следующий вид

$$(2) \quad \begin{cases} y_1' = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n), \\ y_2' = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n), \\ \dots\dots\dots \\ y_n' = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \end{cases}$$

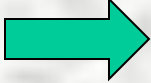
***Решением*** системы (2) на  $(a,b)$  называется совокупность функций

$$y_1 = y_1(x), y_2 = y_2(x), \dots, y_n = y_n(x),$$

непрерывно дифференцируемых на  $(a,b)$  и обращающих каждое уравнение системы (2) в верное равенство.

***Общее решение*** системы (2) — совокупность функций  $y(x, c_1, c_2, \dots, c_n)$ , зависящих от  $n$  произвольных постоянных интегрирования и обращающих систему (2) в систему верных равенств.

## *Утверждение*

ДУ  $n$ -го порядка всегда можно свести к нормальной системе. 

Систему ДУ, записанную в каноническом виде всегда можно свести к нормальному виду.

Обратно: система ДУ, как правило, но не всегда, сводится к ДУ  $n$ -го порядка, решая которое можно найти решение системы.

## Пример.

$$\begin{cases} y_1'' = 2y_1 - 3y_2, \\ y_2'' = y_1 - 2y_2 \end{cases} \quad \text{— каноническая система четвертого} \\ \text{порядка.}$$

Обозначим:

$$y_1' = y_3, \quad y_2' = y_4.$$

Тогда

$$\begin{cases} y_1' = y_3, \\ y_2' = y_4, \\ y_3' = 2y_1 - 3y_2, \\ y_4' = y_1 - 2y_2 \end{cases} \quad \text{— нормальная система четвертого} \\ \text{порядка.}$$

# *Задача Коши для нормальной системы*

Даны система ДУ (2) и начальные условия

$$y_1(x_0) = y_{10}, \dots, y_n(x_0) = y_{n0}.$$

Найти решение системы  $y_1(x), y_2(x), \dots, y_n(x)$ .

*Решение.*

1.

$$\begin{cases} y_1 = y_1(x, c_1, \dots, c_n), \\ y_2 = y_2(x, c_2, \dots, c_n), \\ y_n = y_n(x, c_1, \dots, c_n) \end{cases}$$

2.  $c_1, c_2, \dots, c_n$  из НУ

*Пример* решения системы ДУ *методом*  
*исключения неизвестных.*

$$\begin{cases} y' = z, \\ z' = y \end{cases}$$

*Решение.*

из второго уравнения:  $y = z'$   
 $y' = z''$

$$z'' - z = 0$$

$$\lambda^2 - 1 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = \pm 1$$

*Ответ.*  $z = c_1 \cdot e^x + c_2 \cdot e^{-x}$ ,  
 $y = c_1 \cdot e^x - c_2 \cdot e^{-x}$