

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 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) α не является корнем характеристического уравнения $k^2 + a_1 k + a_2 = 0$,

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

$$\tilde{y} = Q_n(x) e^{\alpha x} = (A_0 x^n + A_1 x^{n-1} + \dots + A_n) e^{\alpha x}.$$

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

$$\begin{aligned} \tilde{y}'' = & Q''_n(x) e^{\alpha x} + Q'_n(x) \alpha e^{\alpha x} + \\ & + Q'_n(x) \alpha e^{\alpha x} + Q_n(x) \alpha^2 e^{\alpha x}, \end{aligned}$$



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

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 $k^2 - 5k + 6 = 0,$

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

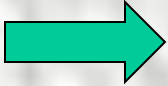
Для $f(x) = e^x \quad \alpha = 1.$

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) α - простой (однократный) корень характеристического уравнения.

Частное решение искать в форме $\tilde{y} = Q_n(x)e^{\alpha x}$ нельзя, т.к. в равенстве $(*) \quad \alpha^2 + a_1\alpha + a_2 = 0$. 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:

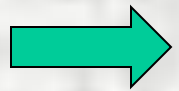
$$\tilde{y} = xQ_n(x)e^{\alpha x}$$

3) α - 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.

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

$$\begin{aligned}\tilde{y}'' &= 4e^{4x} (2Ax + 4Ax^2) + e^{4x} (2A + 8Ax) = \\ &= e^{4x} (8Ax + 16Ax^2 + 2A + 8Ax) = \\ &= e^{4x} (16Ax^2 + 16Ax + 2A),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}e^{4x} (16Ax^2 + 16Ax + 2A) - 8e^{4x} (2Ax + 4Ax^2) + \\ + 16x^2 Ae^{4x} = e^{4x},\end{aligned}$$

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

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

$$y=c_1e^{4x}+c_2xe^{4x}+\frac{1}{2}x^2e^{4x}.$$

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 $\alpha + i\beta = i$

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

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

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

Метод неопределенных коэффициентов

1. Если

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

возможны следующие случаи:

1) α 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) α - 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 :

$$\begin{cases} -A_0 = 1, \\ A_1 = 0, \\ A_2 = 0, \\ A_3 = -1 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \tilde{y} = -x^3 - 1.$$

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

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.

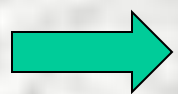
Для ОЛДУ $k^4 - 1 = 0,$

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

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

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 .

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

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

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

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

$$\begin{aligned} &(-4B + Ax)\cos x + (4A + Bx)\sin x - \\ &- Ax \cos x - Bx \sin x = 6 \sin x, \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

[illegible]

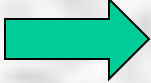
Решением системы (2) на (a,b) называется совокупность функций

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

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.

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

Обозначим:

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

Тогда

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

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