



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет информатики и прикладной математики  
Кафедра прикладной математики и экономико-математических методов

**ОТЧЁТ**  
по дисциплине:  
**«Теория и системы поддержки принятия решений»**  
на тему:  
**«Разностные уравнения. Задание 3»**

Направление: 01.03.02

Обучающийся: Бронников Егор Игоревич

Группа: ПМ-1901

Санкт-Петербург  
2022

## Задача 9

*Задание:* Найти общее решение однородного линейного разностного уравнения:

$$u_{s+4} - 7u_{s+3} + 22u_{s+2} - 32u_{s+1} + 16u_s = 0$$

*Решение:*

Перепишем исходное уравнение в виде для  $s \geq 4$ :

$$u_s - 7u_{s-1} + 22u_{s-2} - 32u_{s-3} + 16u_{s-4} = 0$$

Для получения общего решения однородного разностного уравнения находим фундаментальную систему решений, элементы которой ищем в виде:

$$\check{u}_s = Ch^s$$

Тогда

$$h^s - 7h^{s-1} + 22h^{s-2} - 32h^{s-3} + 16h^{s-4} = 0$$

Находим характеристическое уравнение:

$$H(h) = h^4 - 7h^3 + 22h^2 - 32h + 16 = 0$$

Решаем уравнение, получим следующие корни:  $h_1 = 1, h_2 = 2, h_3 = 2 - 2i, h_4 = 2 + 2i$ .

Можно видеть, что у нас нет кратных корней, но есть комплексные корни. Запишем представление комплексного числа в тригонометрической форме:

$$\hat{u}_s = r^s((C_1 + C_2)\cos(s\phi) + i(C_1 - C_2)\sin(s\phi))$$

Отсюда следует, чтобы получить действительное решение, постоянные надо взять комплексно-сопряжёнными:  $C_{1,2} = U(\cos \theta \pm i \sin \theta)$ .

В итоге, получается:

$$\hat{u}_s = 2Ur^s \cos(s\phi + \theta)$$

где  $r = 2\sqrt{2}, \phi = \frac{\pi}{4}$

Таким образом, общее решение будет выглядеть следующим образом:

$$\check{u}_s = C_1 + 2^s C_2 + 2U(2\sqrt{2})^s \cos\left(\frac{\pi}{4}s + \theta\right)$$

## Задача 10

*Задание:* Найти общее решение неоднородного линейного разностного уравнения первого порядка методом итераций и методом обратного оператора при помощи z-преобразования:

$$u_{s+1} = \frac{6}{7}u_s + \frac{s+6}{s+7}$$

### Метод итераций

Пусть дано  $u_0$ :

$$u_1 = \frac{6}{7}u_0 + \frac{7}{8}$$

$$u_2 = \frac{6}{7}u_1 + \frac{8}{9} = \frac{6}{7} \left( \frac{6}{7}u_0 + \frac{7}{8} \right) + \frac{8}{9} = \left( \frac{6}{7} \right)^2 u_0 + \frac{6 \cdot 7}{7 \cdot 8} + \frac{8}{9}$$

$$\begin{aligned} u_3 &= \frac{6}{7}u_2 + \frac{9}{10} = \frac{6}{7} \left( \left( \frac{6}{7} \right)^2 u_0 + \frac{6 \cdot 7}{7 \cdot 8} + \frac{8}{9} \right) + \frac{9}{10} = \\ &= \left( \frac{6}{7} \right)^3 u_0 + \left( \frac{6}{7} \right)^2 \cdot \frac{7}{8} + \frac{6}{7} \cdot \frac{8}{9} + \frac{9}{10} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_4 &= \frac{6}{7}u_3 + \frac{10}{11} = \frac{6}{7} \left( \left( \frac{6}{7} \right)^3 u_0 + \left( \frac{6}{7} \right)^2 \cdot \frac{7}{8} + \frac{6}{7} \cdot \frac{8}{9} + \frac{9}{10} \right) + \frac{10}{11} = \\ &= \left( \frac{6}{7} \right)^4 u_0 + \left( \frac{6}{7} \right)^3 \cdot \frac{7}{8} + \left( \frac{6}{7} \right)^2 \cdot \frac{8}{9} + \frac{6}{7} \cdot \frac{9}{10} + \frac{10}{11} \end{aligned}$$

...

Общая формула при  $s \geq 1$ :

$$u_s = \left( \frac{6}{7} \right)^s u_0 + \sum_{i=0}^{s-1} \left( \frac{6}{7} \right)^i \frac{(s-i)+6}{(s-i)+7}$$

## Z-преобразование

1) Применим z-преобразование к рассматриваемому уравнению, заменяя  $u_s$  на  $\tilde{u}(z)$ ,  $u_{s-1}$  на  $z^{-1}(\tilde{u}(z) + y_{-1}z)$ .

$$Z\{u_s\} = \tilde{u}(z) = \frac{6}{7}z^{-1}(u_{-1}z + \tilde{u}(z)) + \tilde{x}(z)$$

2) Из полученного выражения выразим  $\tilde{u}(z)$ .

$$\tilde{u}(z) = \frac{6}{7}z^{-1}u_{-1}z + \frac{6}{7}z^{-1}\tilde{u}(z) + \tilde{x}(z)$$

$$\tilde{u}(z) - \frac{6}{7}z^{-1}\tilde{u}(z) = \frac{6}{7}u_{-1} + \tilde{x}(z)$$

$$\tilde{u}(z)(1 - \frac{6}{7}z^{-1}) = \frac{6}{7}u_{-1} + \tilde{x}(z)$$

$$\tilde{u}(z) = \frac{\frac{6}{7}u_{-1} + \tilde{x}(z)}{1 - \frac{6}{7}z^{-1}}$$

$$\tilde{u}(z) = \frac{\frac{6}{7}u_{-1} + \tilde{x}(z)}{z^{-1}(z - \frac{6}{7})}$$

$$\tilde{u}(z) = \frac{\frac{6}{7}u_{-1}z + z\tilde{x}(z)}{z - \frac{6}{7}}$$

3) Разложим  $\tilde{u}(z)$  на простые дроби.

Получившееся выражение уже является простой дробью, так что ничего делать не надо.

4) Выполним обратное z-преобразование.

Воспользуемся способом в котором коэффициенты берутся из ряда Лорана.

$$\begin{aligned} u_s &= \sum_{\zeta_1=\frac{6}{7}} Res \frac{\left(\frac{6}{7}u_{-1} + \tilde{x}(z)\right) z z^{s-1}}{z - \frac{6}{7}} = \lim_{z \rightarrow \frac{6}{7}} \left(z - \frac{6}{7}\right) \frac{\frac{6}{7}u_{-1}z^s + \tilde{x}(z)z^s}{z - \frac{6}{7}} = \\ &= \left(\frac{6}{7}\right)^{s+1} u_{-1} + \tilde{x} \left(\frac{6}{7}\right) \left(\frac{6}{7}\right)^s \\ \text{где } \tilde{x} \left(\frac{6}{7}\right) &= \sum_{k=0}^{\infty} x_k \left(\frac{6}{7}\right)^{s-k} = \sum_{k=1}^s x_k \left(\frac{6}{7}\right)^{s-k} = \sum_{i=0}^{s-1} x_{s-i} \left(\frac{6}{7}\right)^i = \sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s-i)+6}{(s-i)+7} \left(\frac{6}{7}\right)^i \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили следующее решение:

$$u_s = \left(\frac{6}{7}\right)^{s+1} u_{-1} + \sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s-i)+6}{(s-i)+7} \left(\frac{6}{7}\right)^i = \left(\frac{6}{7}\right)^s u_0 + \sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s-i)+6}{(s-i)+7} \left(\frac{6}{7}\right)^i$$

## Обратный оператор

Применим к исходному уравнению оператор сдвига на шаг назад ( $\mathcal{B}$ ):

$$u_s = \frac{6}{7} \mathcal{B} u_s + \frac{s+6}{s+7}$$

Выразим  $u_s$ :

$$u_s - \frac{6}{7} \mathcal{B} u_s = \frac{s+6}{s+7}$$

$$\left(1 - \frac{6}{7} \mathcal{B}\right) u_s = \frac{s+6}{s+7}$$

$$u_s = \left(1 - \frac{6}{7} \mathcal{B}\right)^{-1} \frac{s+6}{s+7}$$

Воспользуемся свойством обратного оператора (разложением в ряд):

$$u_s = \left(1 + \frac{6}{7} \mathcal{B} + \left(\frac{6}{7}\right)^2 \mathcal{B}^2 + \left(\frac{6}{7}\right)^3 \mathcal{B}^3 + \dots\right) \frac{s+6}{s+7}$$

Таким образом, мы получили следующее решение:

$$u_s = \frac{s+6}{s+7} + \frac{6(s-1)+6}{7(s-1)+7} + \left(\frac{6}{7}\right)^2 \frac{(s-2)+6}{(s-2)+7} + \dots$$

## Задача 11

*Задание:* Решить неоднородное разностное уравнение (решить задачу Коши):

$$\begin{aligned}y(s+2) - 9y(s+1) + 20y(s) &= \cos(s) - 2^s \\ y(1) = y(2) &= 0\end{aligned}$$

*Решение:*

Общее решение неоднородного разностного уравнения:

$$y_s = \hat{y}_s + \check{y}_s$$

Составим характеристическое уравнение для однородного уравнения. Для получения общего решения однородного разностного уравнения найдем фундаментальную систему решений, элементы которой ищем в виде:

$$\hat{y}(s) = Ch^s$$

Находим характеристическое уравнение:

$$y(s+2) - 9y(s+1) + 20y(s) = 0$$

$$H(h) = h^2 - 9h + 20 = 0$$

Решаем уравнение, получим следующие корни:  $h_1 = 4$ ,  $h_2 = 5$ .

Можно видеть, что у нас нет кратных вещественных корней и нет комплексных корней, значит мы можем записать общее решение однородного уравнения:

$$\hat{y}(s) = 4^s C_1 + 5^s C_2$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные константы.

Найдём частное решение уравнения. Запишем уравнение в операторной форме:

$$a(\mathcal{B})y(s) = \cos(s) - 2^s$$

где  $a(\mathcal{B})$  – операторный полином,  $\mathcal{B}$  – оператор сдвига на шаг назад.

Тогда формальное частное решение будет выглядеть следующим образом:

$$\check{y}_s = a^{-1}(\mathcal{B})(\cos(s) - 2^s)$$

$$\check{y}_s = (1 - 9\mathcal{B} + 20\mathcal{B}^2)^{-1}(\cos(s) - 2^s)$$

Так как у нас получается обратный полином второй степени и  $h_1, h_2$  — действительны и различны, то корни  $\zeta_{1,2} = \frac{1}{h_{1,2}}$ , обратного характеристического полинома  $a(\zeta) = 0$  также будут действительны и различны. Тогда можно сделать замену:  $a(\zeta) = -a_2(\zeta - \zeta_1)(\zeta - \zeta_2)$   
Таким образом:

$$\check{y}_s = -\frac{1}{a_2} \frac{1}{(\zeta - \zeta_1)(\zeta - \zeta_2)} x_s$$

Разложим  $a^{-1}(\zeta)$  :

$$a^{-1}(\zeta) = -\frac{1}{a_2} \frac{1}{(\zeta - \zeta_1)(\zeta - \zeta_2)} = -\frac{1}{a_2} \left( \frac{g_1}{\zeta - \zeta_1} + \frac{g_2}{\zeta - \zeta_2} \right)$$

Постоянные  $g_1$  и  $g_2$  определяются из соотношения:

$$1 = g_1(\zeta - \zeta_2) + g_2(\zeta - \zeta_1)$$

т.е. при  $\zeta = \zeta_1$ :  $g_1 = \frac{1}{\zeta_1 - \zeta_2}$ , а при  $\zeta = \zeta_2$ :  $g_2 = \frac{1}{\zeta_2 - \zeta_1}$

Таким образом,

$$\check{y}_s = -\frac{1}{a_2} \left( \frac{1}{(\zeta_1 - \zeta_2)(\zeta - \zeta_1)} + \frac{1}{(\zeta_2 - \zeta_1)(\zeta - \zeta_2)} \right) x_s$$

и, переобозначая  $\zeta = \mathcal{B}, \mathcal{B}_1 = \frac{\mathcal{B}}{\zeta_1}, \mathcal{B}_2 = \frac{\mathcal{B}}{\zeta_2}$ , получаем:

$$\check{y}_s = \frac{1}{a_2} \left( \frac{(1 - \mathcal{B}_1)^{-1}}{(\zeta_1 - \zeta_2)\zeta_1} + \frac{(1 - \mathcal{B}_2)^{-1}}{(\zeta_2 - \zeta_1)\zeta_2} \right) x_s$$

Учитывая, что  $(1 - \mathcal{B}_i)^{-1} = (1 + \mathcal{B}_i + \mathcal{B}_i^2 + \dots)$ ,  $i = 1, 2$ , выражение в больших круглых скобках имеет вид:

$$\left( \frac{1/\zeta_1 + \mathcal{B}/\zeta_1^2 + \mathcal{B}^2/\zeta_1^3 + \dots}{\zeta_1 - \zeta_2} + \frac{1/\zeta_2 + \mathcal{B}/\zeta_2^2 + \mathcal{B}^2/\zeta_2^3 + \dots}{\zeta_2 - \zeta_1} \right) =$$

$$\frac{1}{\zeta_1 - \zeta_2} \sum_{k=0}^{s-1} \left( \frac{1}{\zeta_1^k} - \frac{1}{\zeta_2^k} \right) \mathcal{B}^{k-1}$$

Окончательно, получаем частное решение уравнения:

$$\begin{aligned}
 \check{y}_s &= \frac{1}{a_2} \frac{h_1 h_2}{h_2 - h_1} \sum_{k=0}^{s-1} (h_1^k - h_2^k) x_{s-(k-1)} = \\
 &= \frac{1}{20} \frac{4 \times 5}{5 - 4} \sum_{k=0}^{s-1} (4^k - 5^k) (\cos(s - (k - 1)) - 2^{s-(k-1)}) = \\
 &= \sum_{k=0}^{s-1} (4^k - 5^k) (\cos(s - (k - 1)) - 2^{s-(k-1)})
 \end{aligned}$$

Таким образом, общее решение неоднородного разностного уравнения будет выглядеть следующим образом:

$$y_s = \hat{y}_s + \check{y}_s = 4^s C_1 + 5^s C_2 + \sum_{k=0}^{s-1} (4^k - 5^k) (\cos(s - (k - 1)) - 2^{s-(k-1)})$$

Найдём значения  $C_1$  и  $C_2$ , зная, что  $y(1) = y(2) = 0$ :

$$\begin{cases} y(1) = y_1 = 4C_1 + 5C_2 = 0 \\ y(2) = y_2 = 16C_1 + 25C_2 + (4 - 5)(\cos(2) - 4) = 0 \end{cases}$$

Решение системы:

$$C_1 = \frac{1}{4}(4 - \cos(2)), C_2 = \frac{1}{5}(-4 + \cos(2))$$

Таким образом, общее решение примет вид:

$$y_s = \sum_{k=0}^{s-1} (4^k - 5^k) (\cos(s - (k - 1)) - 2^{s-(k-1)})$$



## Задача 12

*Задание:* Модель делового цикла Самуэльсона-Хикса предполагает прямую пропорциональность объемов инвестирования приросту национального дохода (принцип акселерации), т.е.  $I_t = V(X_{t-1} - X_{t-2})$ , где коэффициент  $V > 0$  – фактор акселерации,  $I_t$  – величина инвестиций в период  $t$ ,  $X_{t-1}, X_{t-2}$  величины национального дохода соответственно в  $(t-1)$ -ом и  $(t-2)$ -ом периодах. Предполагается также, что спрос на данном этапе  $C_t$  зависит от величины национального дохода на предыдущем этапе  $X_{t-1}$  линейным образом  $C_t = aX_{t-1} + b$ . Условие равенства спроса и предложения имеет вид  $X_t = I_t + C_t$ . Тогда приходим к уравнению Хикса:

$$X_t = (a + V)X_{t-1} - VX_{t-2} + b$$

Стационарная последовательность  $X_t^* = c = \text{const}$  является решением уравнения Хикса только при  $c = b(1 - a)^{-1}$ , множитель  $(1 - a)^{-1}$  называется мультипликатором Кейнса (одномерный аналог матрицы полных затрат).

Рассмотреть уравнение Хикса. Какова динамика роста национального дохода?

При  $V = a = \frac{1}{2}, b = 1$  уравнение Хикса будет иметь вид:

$$X_t = X_{t-1} - \frac{1}{2}X_{t-2} + 1$$

$$X_t - X_{t-1} + \frac{1}{2}X_{t-2} = 1$$

*Решение:*

Для получения общего решения однородного разностного уравнения найдем фундаментальную систему решений, элементы которой ищем в виде:

$$\hat{X}_t = Ch^t$$

Находим характеристическое уравнение:

$$H(h) = h^2 - h + \frac{1}{2} = 0$$

Решаем уравнение, получим следующие корни:  $h_1 = \frac{1}{2} - \frac{i}{2}, h_2 = \frac{1}{2} + \frac{i}{2}$ .

Можно видеть, что у нас нет кратных корней, но есть комплексные корни.

Запишем представление комплексного числа в тригонометрической форме:

$$\hat{X}_t = r^t((C_1 + C_2) \cos(t\phi) + (C_1 - C_2) \sin(t\phi))$$

где  $r = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Таким образом, общее однородное решение уравнения можно представить в виде:

$$\hat{X}_t = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^t ((C_1 + C_2) \cos(t\phi) + (C_1 - C_2) \sin(t\phi))$$

Найдём частное решение уравнения. Запишем уравнение в операторной форме:

$$\check{X}_t = a^{-1}(\mathcal{B})a_0 = (1 - a_1\mathcal{B} - a_2\mathcal{B}^2)^{-1}a_0 = (1 - (a_1\mathcal{B} + a_2\mathcal{B}^2))^{-1}a_0 = a_0 \sum_{k=1}^{\infty} (a_1 + a_2)^k$$

где  $a(\mathcal{B})$  – операторный полином,  $\mathcal{B}$  – оператор сдвига на шаг назад.

Таким образом, общее частное решение уравнения можно представить в виде:

$$\check{X}_t = \sum_{k=0}^{\infty} \left(-1 + \frac{1}{2}\right)^k = \sum_{k=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{2}\right)^k = \frac{2}{3}$$

В итоге, общее решение уравнения примет следующую форму:

$$X_t = \hat{X}_t + \check{X}_t = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^t ((C_1 + C_2) \cos(t\phi) + (C_1 - C_2) \sin(t\phi)) + \frac{2}{3}$$

## Выводы

Таким образом, данное решение осциллирует (колеблется), так как у нас присутствует  $\cos(t\phi)$  и  $\sin(t\phi)$  и при достаточно больших  $t$  наше решение будет асимптотически сходить к  $\frac{2}{3}$ .

## Задача 13

*Задание:* Рассмотрим путинную модель рынка. Предположим, что спрос и предложение задаются линейными функциями, но спрос заисит от цены в данный момент времени, а предложение зависит от цены на предыдущем этапе, т.е.

$$d_t = a - bp_t \text{ (функция спроса)}$$

$$s_t = m + np_{t-1} \text{ (функция предложения)}$$

где  $a, b, m, n$  – положительные действительные числа.

Считая,  $s_t = d_t$  получаем линейное разностное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами,

$$a - bp_t = m + np_{t-1}$$

здесь  $a = 1, b = \frac{3}{2}, m = \frac{1}{2}, n = \frac{1}{4}$

$$1 - \frac{3}{2}p_t = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}p_{t-1}$$

$$\frac{3}{2}p_t + \frac{1}{4}p_{t-1} = \frac{1}{2}$$

*Решение:*

Для получения общего решения однородного разностного уравнения находим фундаментальную систему решений, элементы которой ищем в виде:

$$\hat{p}_t = Ch^t$$

Находим харатеристическое уравнение:

$$H(h) = \frac{3}{2}h + \frac{1}{4} = 0$$

Решаем уравнение, получим следующее решение:  $h = -\frac{1}{6}$ .

Можно видеть, что у нас нет кратных вещественных корней и нет комплексных корней, значит мы можем записать общее решение однородного уравнения:

$$\hat{p}_t = \left(-\frac{1}{6}\right)^t C$$

Найдём частное решение уравнения. Запишем уравнение в операторной форме:

$$\check{p}_t = a^{-1}(\mathcal{B})a_0 = (1 + a_1\mathcal{B})^{-1}a_0 = (1 - (-a_1\mathcal{B}))^{-1}a_0 = a_0 \sum_{k=1}^{\infty} (-a_1)^k$$

где  $a(\mathcal{B})$  – операторный полином,  $\mathcal{B}$  – оператор сдвига на шаг назад.

Таким образом, общее частное решение уравнения можно представить в виде:

$$\check{p}_t = \sum_{k=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{4}\right)^k = \frac{4}{5}$$

В итоге, общее решение уравнения примет следующую форму:

$$p_t = \hat{p}_t + \check{p}_t = \left(-\frac{1}{6}\right)^t C + \frac{4}{5}$$

## Выводы

Таким образом, данное решение при достаточно больших  $t$  будет асимптотически сходиться к  $\frac{4}{5}$ .