

# Практический линал. Лабораторная работа № 2

Троицкая Тамара 368924

21 октября 2023 г.

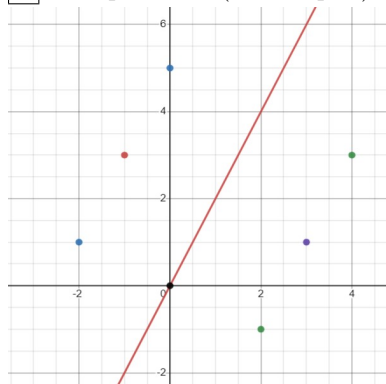
Todo:

1. Содержание с навигацией
2. Оставить второе отдельно, а третье написать вместе с первым

В прошлый раз я написала код на C, но не заморочилась с оформлением. На этот раз я написала код на C++ для умножения матриц и, как видите, оформила отчёт в латехе. Основные функции из этой работы я вставлю в конце отчёта, чтобы не смущать людей. Также, признаюсь, написала на python код, чтобы обрабатывать в L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X матрицы и векторы. При желании все исходники можно найти здесь: [https://github.com/cgsg-tt6ITMO/s3\\_practlinl\\_lab2](https://github.com/cgsg-tt6ITMO/s3_practlinl_lab2)

**Задание 1. Придумайте.** Придумайте матрицы  $2 \times 2$ , которые задают:

- 1] Отображение (симметрия) плоскости относительно  $y = ax$  ( $a = 2$ )



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 0 & 5 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 4 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot B = C$$

где матрица  $A$  - искомая матрица преобразования, столбцы матрицы  $B$  - это исходные векторы, а столбцы матрицы  $C$  - это полученные в результате преобразования векторы.

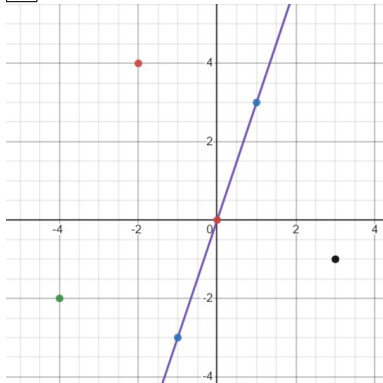
$$A = C \cdot B^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 3 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix}}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-0.6) \cdot (-2) + 0.8 \cdot 1 \\ 0.8 \cdot (-2) + 0.6 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -1 \end{pmatrix}$$

2 Отображение всей плоскости в прямую  $y = bx$  ( $b = 3$ )



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} -2 & 4 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -4 & -2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & -3 \end{pmatrix}$$

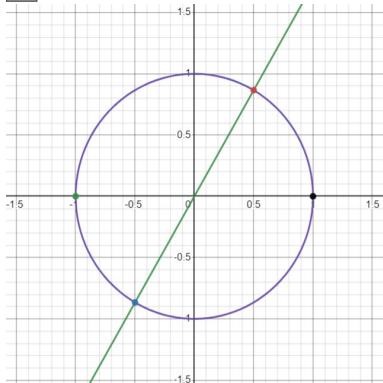
$$C \cdot B^{-1} = A$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 3 & -3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -2 & -4 \\ 4 & -2 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 \end{pmatrix}}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1 \cdot 3 + 0.3 \cdot (-1) \\ 0.3 \cdot 3 + 0.9 \cdot (-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

3 Поворот плоскости на 10с (60) градусов против часовой стрелки.



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

$$C \cdot B^{-1} = A$$

$$\begin{pmatrix} 1/2 & -1/2 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix}}$$

Вспомним, что матрица поворота на  $\alpha$ :

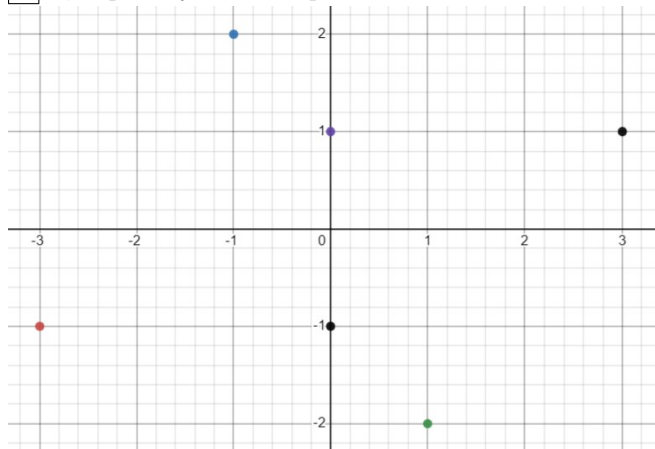
$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

Полученный нами результат согласуется с теорией.

Проверка:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

4 Центральную симметрию плоскости относительно начала координат.



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -2 \end{pmatrix}$$

$$C \cdot B^{-1} = A$$

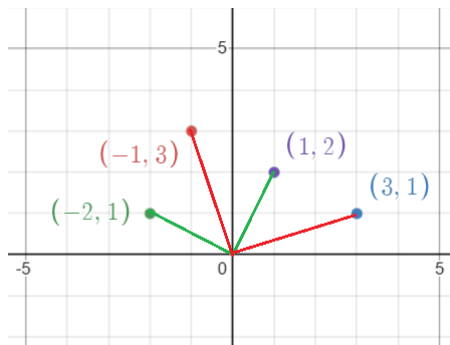
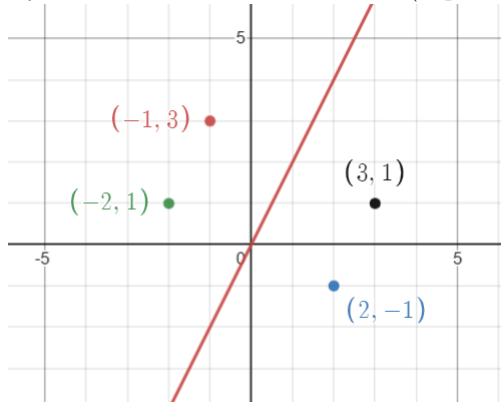
$$\begin{pmatrix} -3 & 1 \\ -1 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

5 Отображение, которое можно описать так: сначала отражение относительно прямой  $y = ax$  ( $y = 2x$ ), потом поворот на  $10d$  (90) градусов по часовой стрелке.

Будем искать точки в два этапа (отразить, повернуть):



Запишем преобразование векторов в два этапа:

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C \cdot B^{-1} = A = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} 0.8 & 0.6 \\ 0.6 & -0.8 \end{pmatrix}}$$

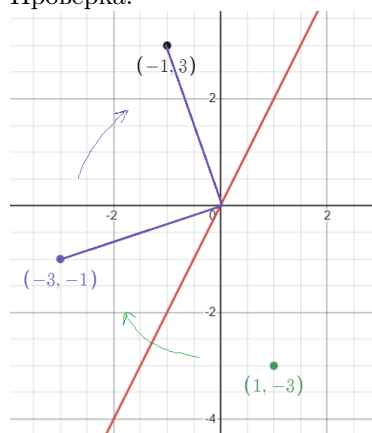
Заметим, что

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.6 \\ 0.6 & -0.8 \end{pmatrix}$$

То есть эту матрицу можно получить последовательным умножением матрицы поворота (см. п. 3) и матрицы отражения (см. п. 1). Порядок именно такой, потому что при умножении этой конструкции на вектор сначала на него умножится матрица отражения, находящаяся правее, а потом уже матрица поворота. Можно

сказать, что действие произойдёт справа налево.

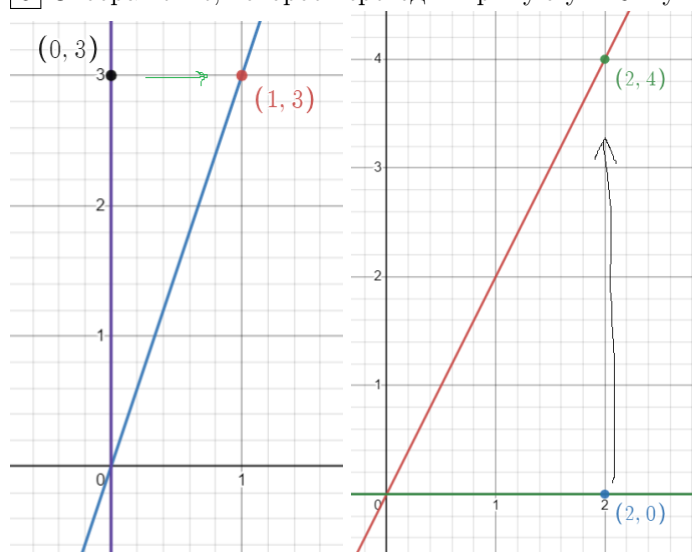
Проверка:



$$\begin{pmatrix} 1 & -3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -3 & -1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.6 \\ 0.6 & -0.8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

6 Отображение, которое переводит прямую  $y = 0$  в  $y = ax$  ( $y = 2x$ ) и прямую  $x = 0$  в  $y = bx$  ( $y = 3x$ ).



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 0 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 4 \end{pmatrix}$$

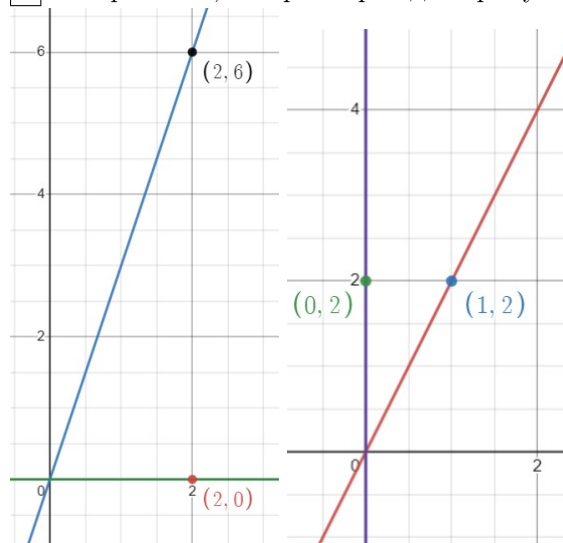
$$C \cdot B^{-1} = A$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 0 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1/3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \end{pmatrix}$$

- 7 Отображение, которое переводит прямую  $y = ax$  ( $y = 2x$ ) в  $y = 0$  и прямую  $y = bx$  ( $y = 3x$ ) в  $x = 0$ .



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 2 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 2 \end{pmatrix}$$

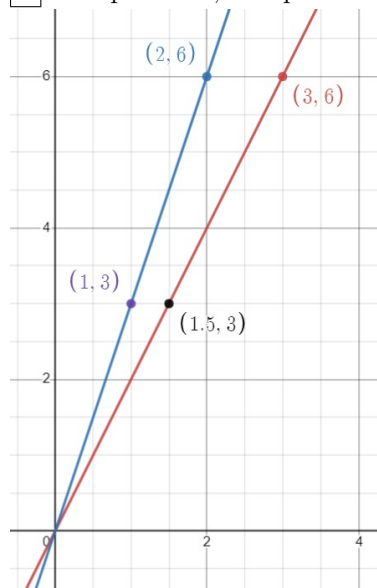
$$C \cdot B^{-1} = A$$

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 6 & 2 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ 6 & -2 \end{pmatrix}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} -2 & 1 \\ 6 & -2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix}$$

- 8 Отображение, которое меняет местами прямые  $y = ax$  и  $y = bx$  ( $y = 2x$  и  $y = 3x$ ).



Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1.5 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 3 & 6 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 2 & 6 \end{pmatrix}$$

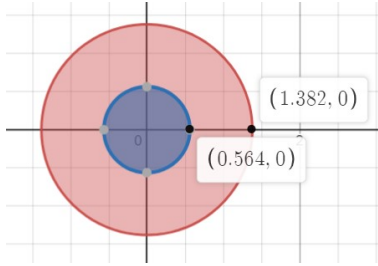
$$C \cdot B^{-1} = A$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 5/6 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Проверка:

$$\begin{pmatrix} -1 & 5/6 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.5 \\ -3 \end{pmatrix}$$

9 Отображение, которое переводит круг единичной площади с центром в начале координат в круг площади  $c$  ( $c = 6$ ).



$$\pi r^2 = 1$$

$$r = 1/\sqrt{\pi}$$

$$\pi R^2 = c$$

$$R = \sqrt{c/\pi} = \sqrt{6/\pi}$$

Примеры преобразования точек:

$$\begin{pmatrix} 0 & r \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & R \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} R & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1/\sqrt{\pi} \\ 1/\sqrt{\pi} & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{6/\pi} \\ \sqrt{6/\pi} & 0 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \sqrt{6} & 0 \\ 0 & \sqrt{6} \end{pmatrix}$$

10 Отображение, которое переводит круг единичной площади с центром в начале координат в некруг площади  $d$  ( $d = 9$ ).

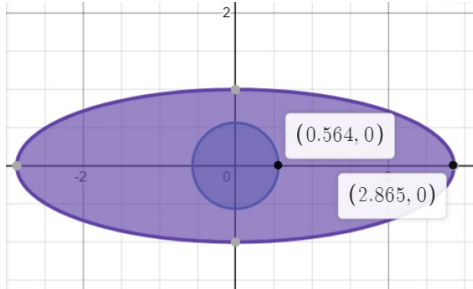
$$\pi r^2 = 1$$

$$r = 1/\sqrt{\pi}$$

Допустим, некруг это эллипс. Площадь эллипса вычисляется как  $S = ab\pi$ . Например,  $a = 9/\pi$ ,  $b = 1$ . Тогда по оси  $oy$  фигура растягивается в  $1/\sqrt{\pi} : 1$  раз, по оси  $ox$  в  $\frac{1}{\sqrt{\pi}} : \frac{9}{\pi}$  раз.

То есть собственные векторы:  $v_1 = (0, 1)$  и  $v_2 = (1, 0)$ ,

а соответствующие им собственные числа:  $\lambda_1 = 1/\sqrt{\pi}$ ,  $\lambda_2 = 9\sqrt{\pi}$



$$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{\pi} & 0 \\ 0 & 9\sqrt{\pi} \end{pmatrix}$$

**11** Отображение, у которого собственные вектора перпендикулярны, и ни один из них не лежит на прямой  $y = 0$  или  $y = x$ .

$$\text{Пусть } v_1 = \begin{pmatrix} 2 & 1 \end{pmatrix} \lambda_1 = -1,$$

$$v_2 = \begin{pmatrix} -1 & 2 \end{pmatrix} \lambda_2 = 3/2$$

$$A \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} = -1 \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix} = 3/2 \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$A \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & -1.5 \\ -1 & 3 \end{pmatrix}$$

$$A = C \cdot B^{-1} = \begin{pmatrix} -2 & -1.5 \\ -1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}^{-1} = \boxed{\begin{pmatrix} -0.5 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}}$$

**12** Отображение, у которого нет двух неколлинеарных собственных векторов.

$$\boxed{\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}}$$

Это Жорданова клетка для  $\lambda = 2$  с геометрической кратностью 1. Все собственные векторы пропорциональны  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ , то есть коллинеарны. (Если говорить безграмотно, у неё только один собственный вектор)

**13** Отображение, у которого нет ни одного вещественного собственного вектора (но при этом само отображение задаётся вещественной матрицей).

$$\boxed{\begin{pmatrix} -2 & -1 \\ 9 & -2 \end{pmatrix}}$$

$$\det \begin{pmatrix} -2 - \lambda & -1 \\ 9 & -2 - \lambda \end{pmatrix} = (\lambda + 2)^2 + 9 = 0$$

$$\lambda_1 = -2 - 3i \quad v_1 = \begin{pmatrix} -i/3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_2 = -2 + 3i \quad v_2 = \begin{pmatrix} i/3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

**14** Отображение, для которого любой ненулевой вектор является собственным.

$$\boxed{\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}}$$

$$\lambda = 4$$

$$\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4x \\ 4y \end{pmatrix}$$

$$\forall x, y$$

**15** Пару отображений, последовательное применение которых даёт различные результаты в зависимости от порядка:  $AB \neq BA$ .

Отразим относительно прямой  $y = x$  и повернём на  $90^\circ$  против часовой стрелки.

Матрица поворота на  $90^\circ$  против часовой стрелки:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица отражения относительно прямой  $y = x$ :

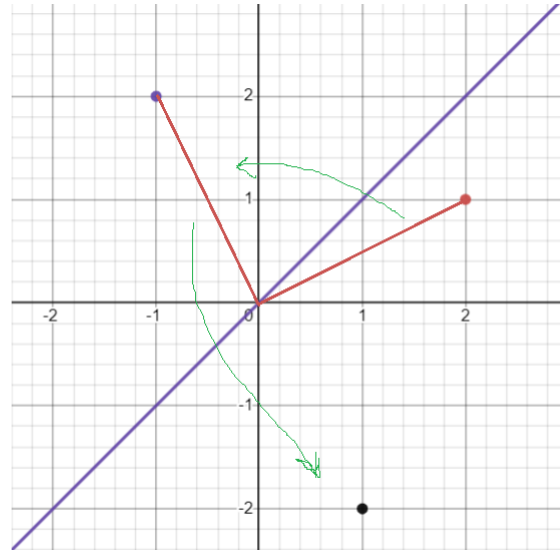
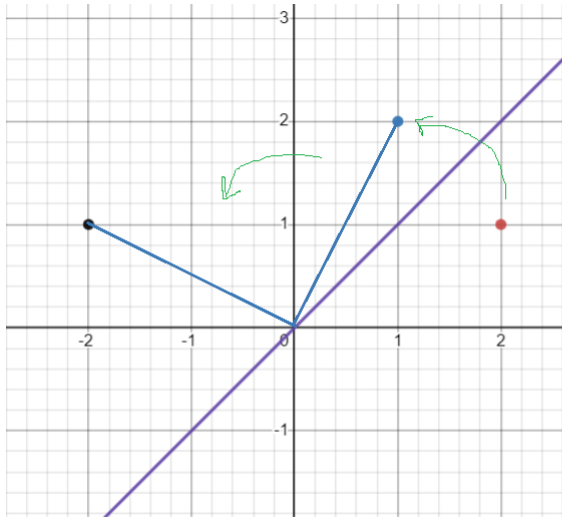
$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Отразить и потом повернуть:

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Повернуть и потом отразить:

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$



Слева отразили и повернули, справа повернули и отразили. Результаты не совпали.

**16** Пару отображений, последовательное применение которых даёт одинаковый результат независимо от порядка:  $AB = BA$ . Постарайтесь, чтобы матрицы  $A$  и  $B$  были максимально непохожими друг на друга.

Сделать два поворота. Сначала на  $60^\circ$ , потом на  $30^\circ$ . И в обратной последовательности.

Матрица поворота на  $60^\circ$  против часовой стрелки:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Матрица поворота на  $30^\circ$  против часовой стрелки:

$$B = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/2 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Нетрудно заметить, что в обоих случаях получилась матрица поворота на  $90^\circ$  против часовой оси. Это согласуется с теорией (и здравым смыслом) – порядок выполнения двух поворотов неважен, повороты "складываются".



**Задание 2. Проанализируйте.**

- Найдите образ и ядро придуманных вами отображений из пунктов 1, 2, 13, 14.

$$1) \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0 & 1.25 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.6 \end{pmatrix}$$

Получаем образ:

$$\text{im}(A) = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} -0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.6 \end{pmatrix}\right] = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} -3 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}\right]$$

$$\text{rank}(A) = 2$$

$$\text{nullity}(A) = 0$$

$$\ker f(A) = \{0\}$$

$$2) \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(A) = 1$$

$$\text{nullity}(A) = 1$$

$$\text{im}(A) = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}\right]$$

$$\text{Ядро: } 0.1x + 0.3y = 0$$

$$\ker f(A) = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}\right]$$

$$13) \begin{pmatrix} -2 & -1 \\ 9 & -2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} -2 & -1 \\ 0 & -6.5 \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(A) = 2$$

$$\text{im}(A) = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} -2 \\ 9 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix}\right]$$

$$\text{nullity}(A) = 0$$

$$\ker f(A) = \{0\}$$

$$14) \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(A) = 2$$

$$\text{nullity}(A) = 0$$

Образ – любой вектор длины 2.

$$\text{Im}(A) = \text{Span}\left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right]$$

$$\ker f(A) = \{0\}$$

- Найдите собственные числа и собственные вектора придуманных вами отображений из пунктов 1, 2, 3, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16.

$$1) \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix}$$

$$\det \begin{pmatrix} -0.6 - \lambda & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 - \lambda \end{pmatrix} = (\lambda + 0.6) \cdot (\lambda - 0.6) - 0.64 = \lambda^2 - 0.36 - 0.64 = \lambda^2 - 1 = 0$$

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$2) \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 \end{pmatrix}$$

$$\det \begin{pmatrix} 0.1 - \lambda & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 - \lambda \end{pmatrix} = (0.1 - \lambda) \cdot (0.9 - \lambda) - 0.9 = \lambda^2 - \lambda + 0.9 - 0.9 = 0$$

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$3) \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = \frac{-\sqrt{3}i+1}{2}, \lambda_2 = \frac{\sqrt{3}i+1}{2}$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$4) \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$8) \begin{pmatrix} -1 & 5/6 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 5/12 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$11) \begin{pmatrix} -0.5 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = -1, \lambda_2 = 1.5$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} -0.5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$12) \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 2$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$13) \begin{pmatrix} -2 & -1 \\ 9 & -2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = -2 - 3i, \lambda_2 = -2 + 3i$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} -i/3 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} i/3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$14) \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 4$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$15)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = i, \lambda_2 = -i$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = -1$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

16)

$$A = \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = \frac{-\sqrt{3}i+1}{2}, \lambda_2 = \frac{\sqrt{3}i+1}{2}$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/2 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = \frac{\sqrt{3}-i}{2}, \lambda_2 = \frac{\sqrt{3}+i}{2}$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1 = i, \lambda_2 = -i$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} -i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

• Найдите определитель матриц из пунктов 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10.

$$1) \det \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{pmatrix} = -0.36 - 0.64 = -1$$

$$2) \det \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.9 \end{pmatrix} = 0$$

$$3) \det \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} = 1/4 + 3/4 = 1$$

$$4) \det \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = 1$$

$$5) \det \begin{pmatrix} 0.8 & 0.6 \\ 0.6 & -0.8 \end{pmatrix} = -0.64 - 0.36 = -1$$

$$9) \det \begin{pmatrix} \sqrt{6} & 0 \\ 0 & \sqrt{6} \end{pmatrix} = 6$$

$$10) \det \begin{pmatrix} 1/\sqrt{\pi} & 0 \\ 0 & 9\sqrt{\pi} \end{pmatrix} = 9/\pi$$

- В каких пунктах матрица обязательно получается симметричной?

Точно да: 1, 2, 4, 5, 9, 14.

(точно будет 2 вещественных собственных вектора и вещественные собственные числа)

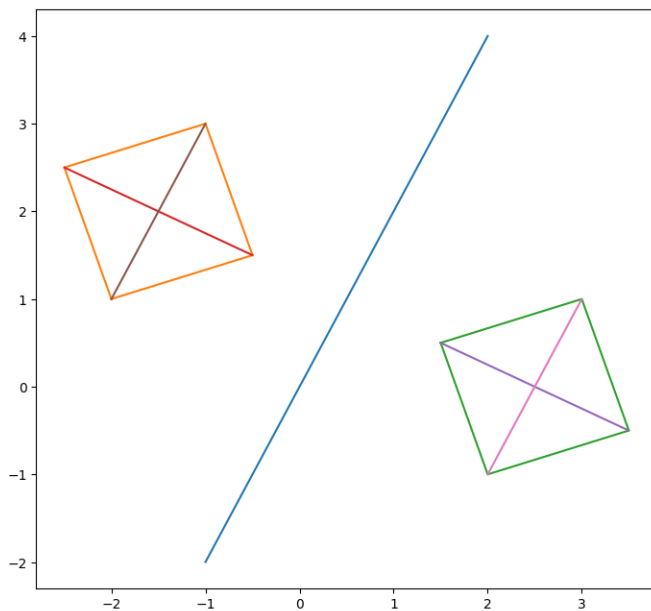
Точно не: 3, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16. 10, 11.

**Задание 3. Визуализируйте.** Используя MATLAB или Python, выполните визуализацию полученных линейных преобразований. Для этого:

- Задайте произвольную фигуру как многоугольник с вершинами в выбранных вами точках. Постройте её графическое изображение. Это – оригинал.
- Найдите образ каждой вершины многоугольника при линейном отображении рассматриваемой матрицей. Постройте графическое изображение многоугольника на полученных (отображённых) вершинах. Это – результат преобразования, образ.
- Выполните указанную визуализацию для всех отображений из первого задания.
- При работе с пунктами 15 и 16 сделайте визуализацию всех рассматриваемых отображений, а именно:  $A$ ,  $B$ ,  $AB$  и  $BA$ .
- Для пунктов 1, 11, 12, 14, 15, 16 добавьте на картинку прямые, совпадающие с направлениями собственных векторов.

В отображениях, где поворот или отражение производится относительно центра, я добавила оси.

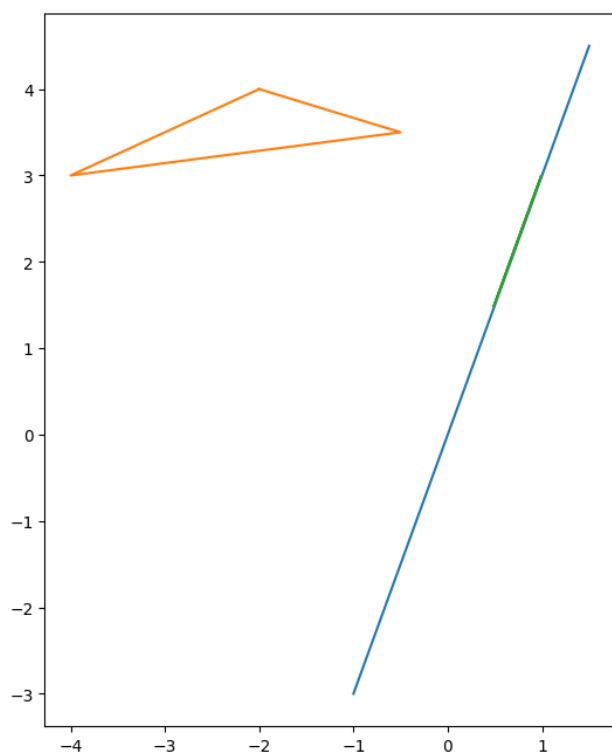
1) !



Зелёный – оригинал, рыжий – его образ. Но вообще они переходят друг в друга. Синяя прямая – ось симметрии.

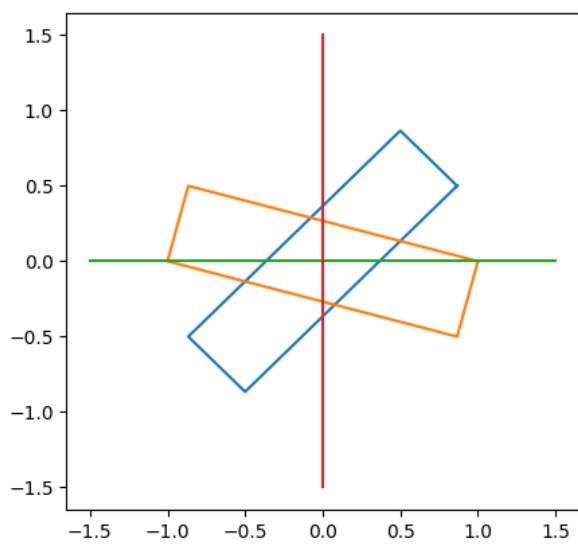
Фиолетовый и красный, розовый и коричневый соответственно коллинеарны собственным векторам матрицы этого отображения, поэтому они не изменили направления.

2)



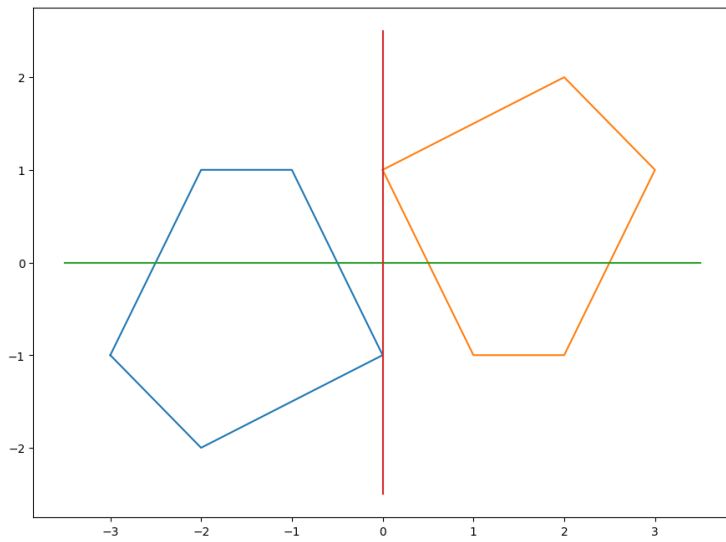
Рыжий – оригинал, он перешёл в зелёный отрезок.

3)



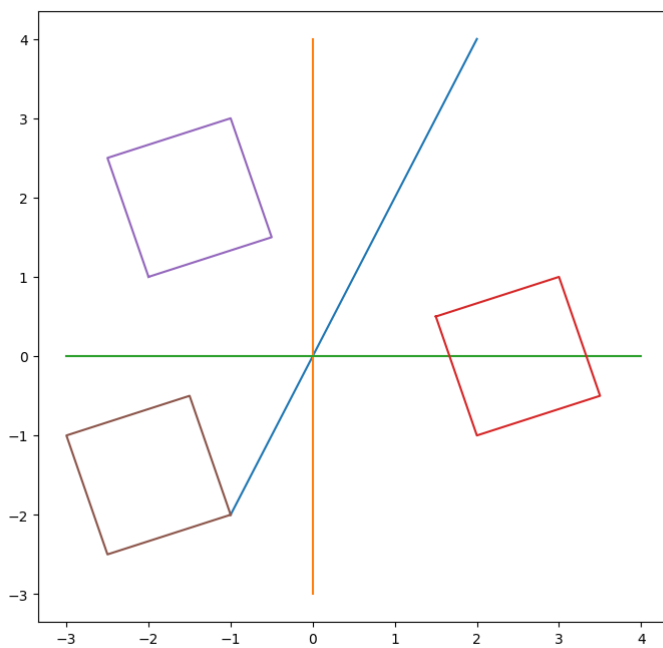
Рыжий – оригинал, синий – его образ

4)



Рыжий – оригинал, синий – его образ (но они переходят друг в друга вообще)

5)



Красный квадрат отразили, получили фиолетовый. Фиолетовый повернули на 90 градусов – получили коричневый.

6)

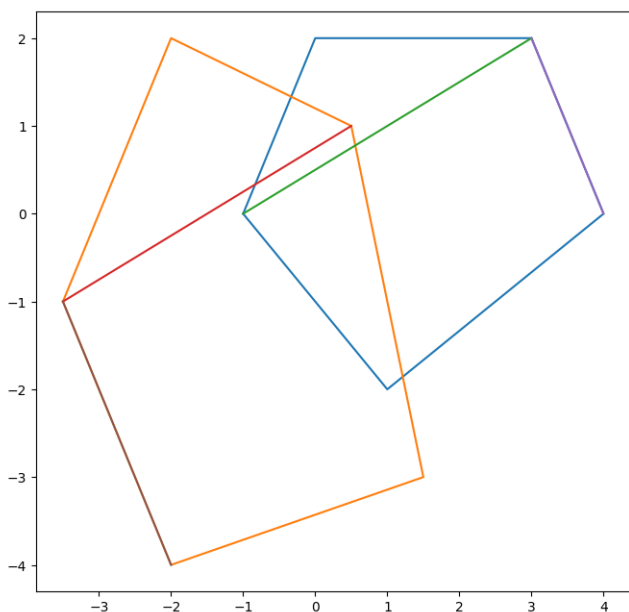
7)

8)

9)

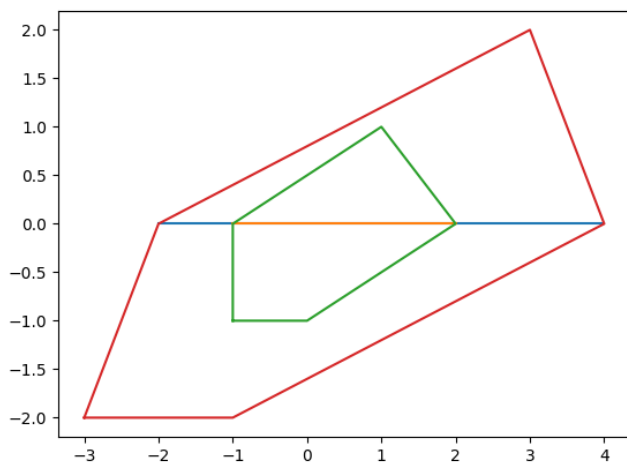
10)

11) !



Синий – оригинал, рыжий – его образ. Причём зелёный и красный отрезки остались параллельными, аналогично – фиолетовое и коричневое рёбра. Это произошло потому, что они коллинеарны собственным векторам матрицы данного отображения и не меняют направления, меняют только длину в соответствии с собственными числами.

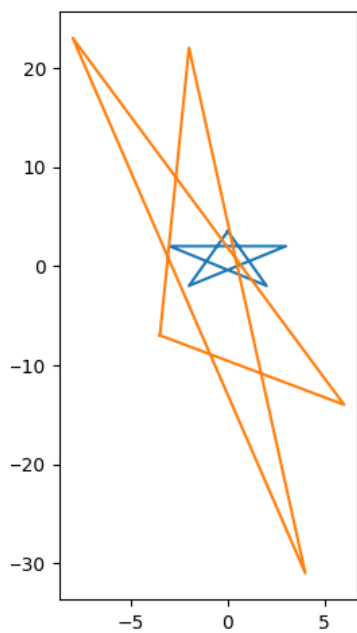
12) !



Зелёный – оригинал, красный – его образ. У данного отображения только один собственный вектор. и вот, не изменили направление только рыжий отрезок, перейдя в синий.

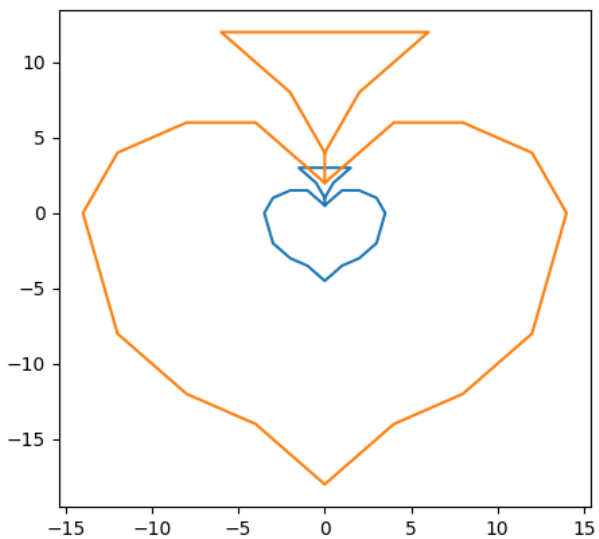
13)





У этого отображения нет вещественных собственных векторов, то есть все векторы будут поворачиваться. Оригинал синий, его образ рыжий.

14) !

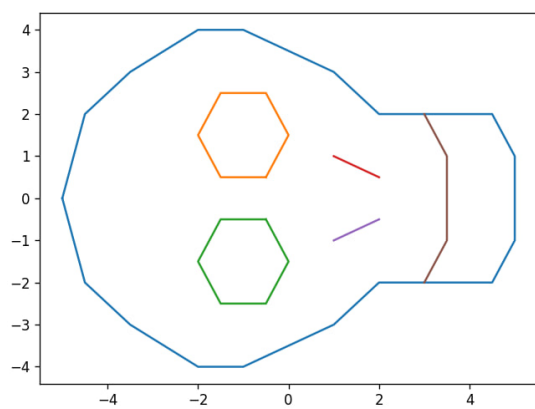
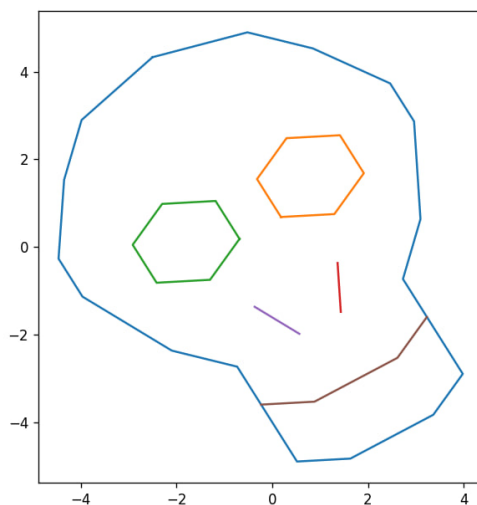
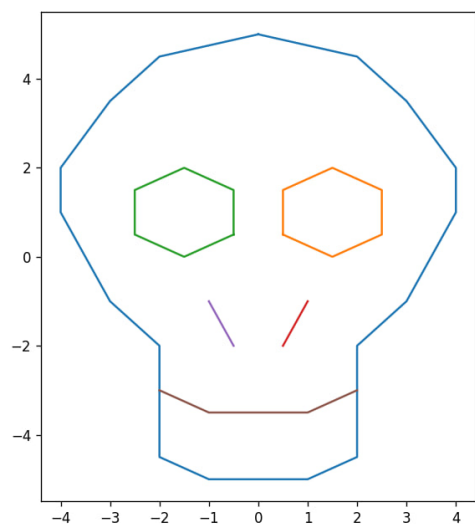


15) !

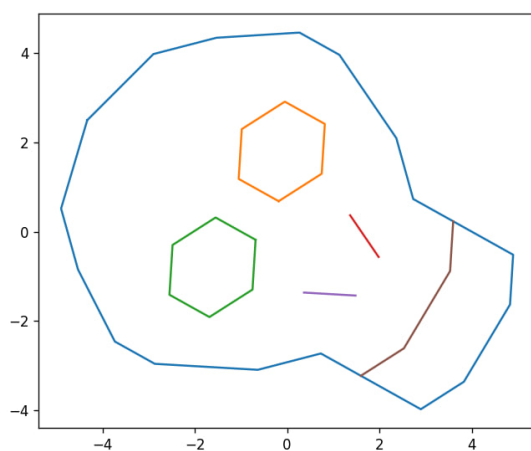
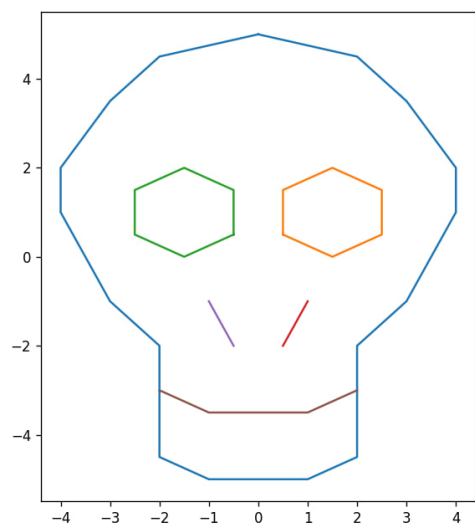
16) !

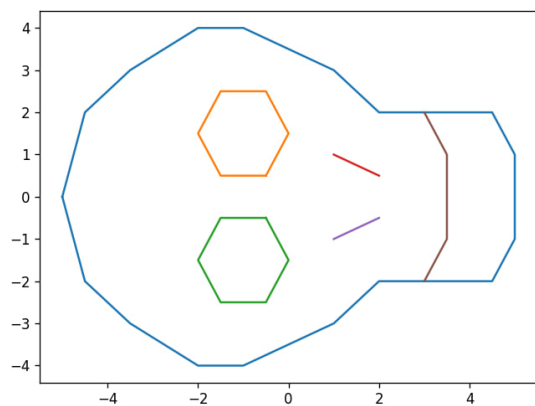
Собственные векторы этого отображения комплексные, поэтому изобразить их не представляется возможным.

Сначала на 30, потом на 60:



Сначала на 60, потом на 30:





я вертела это всё короче

А здесь мой уважаемый читатель может наконец увидеть небольшую выжимку из самых важных функций моего проекта.

1) Вспомогательные функции для подсчёта определителя (с++)

```
144  /* Calculates minor of the matrix.
145  ***Arguments:
146  ***-- pointer to the matrix nxm:
147  ***-- matrix* M.
148  ***-- indexes of row and column to be deleted:
149  ***-- size_t x, size_t y.
150  ***Returns:
151  ***-- (matrix)-- minor matrix (n-1)x(m-1)
152  */
153  matrix math::matr_minor(matrix* M, size_t x, size_t y) {
154      size_t n = M->n, m = M->m;
155      double** a = M->arr;
156      double** res = allocate_memory(n-1, m-1);
157      size_t i_m = 0, j_m;
158      for (size_t i = 0; i < n; i++) {
159          if (i == x) continue;
160          j_m = 0;
161          for (size_t j = 0; j < m; j++) {
162              if (j != y && i_m < (n-1) && j_m < (m-1)) {
163                  res[i_m][j_m] = a[i][j];
164                  j_m++;
165              }
166          }
167          if (i != x) {
168              i_m++;
169          }
170      }
171      return matrix{ n-1, m-1, res };
172  }
```

```
174  /* Calculates the determinant.
175  ***Arguments:
176  ***-- pointer to the matrix:
177  ***-- matrix* M.
178  ***Returns:
179  ***-- (double)-- the determinant.
180  */
181  double math::determinant(matrix* M) {
182      size_t n = M->n;
183      if (n != M->m) {
184          std::cout << "This matrix is not squared, determinant cannot be calculated."
185          << std::endl;
186      }
187      double** a = M->arr;
188      if (M->n == 1) return a[0][0];
189      if (M->n == 2) return a[0][0] * a[1][1] - a[0][1] * a[1][0];
190
191      double res = 0, coef = 1;
192      for (size_t i = 0; i < n; i++) {
193          matrix cur_minor = matr_minor(M, 0, i);
194          res += coef * a[0][i] * determinant(&cur_minor);
195          coef *= -1;
196      }
197      return res;
198  }
199  }
```

2) Функции для работы с матрицами для первого задания (с++)

```
232  /* There is an equation  $A \cdot B = C$ . Get matrix A.
233  *... Arguments:
234  *... --matrix B:
235  *... --matrix C:
236  *... --matrix C:
237  *... Returns:
238  *... (matrix) --matrix A.
239  */
240
241  matrix math::get_matrix(matrix B, matrix C) {
242      return matr_mul_matr(C, matr_invert(&B));
243  }
```

```
200  /* Calculates inverted matrix.
201  *... Arguments:
202  *... --pointer to matrix to be inverted:
203  *... --matrix M.
204  *... Returns:
205  *... (matrix) --the inverted matrix.
206  */
207  matrix math::matr_invert(matrix* M) {
208      size_t n = M->n, m = M->m;
209      if (n != m) {
210          std::cout << "This matrix cannot be inverted." << std::endl;
211          return matrix{0, 0, NULL};
212      }
213      double** arr = allocate_memory(n, m);
214      double coef;
215      //adjusted
216      for (size_t i = 0; i < n; i++) {
217          for (size_t j = 0; j < n; j++) {
218              if (i % 2 != j % 2) {
219                  coef = -1;
220              }
221              else coef = 1;
222              matrix minorr = matr_minor(M, i, j);
223              arr[i][j] = determinant(&minorr) * coef;
224          }
225      }
226      //transpose
227      matrix res = matr_transpose(matrix{n, m, arr});
228      //multiply to inv to det
229      return num_mul_matr(1.0 / determinant(M), res);
230  }
```

```

39  /* Multiplies two matrices. Validates sizes.
40  *** Arguments:
41  *-----first matrix:
42  *-----matrix A,
43  *-----second matrix:
44  *-----matrix B.
45  *** Returns:
46  *----- (matrix) -- result of multiplication.
47  *** Notes:
48  *----- Returns {0, 0, NULL}, if matrices are incompatible.
49  */
50  matrix math::matr_mul_matr(matrix A, matrix B) {
51      size_t n = A.n, m = B.m, l = A.m;
52      // validate sizes
53      if (l != B.n) {
54          printf("Those matrices cannot be multiplied\n");
55          printf("A: %zux%zu, B: %zux%zu\n", n, l, B.n, m);
56          matrix res = {0, 0, NULL};
57          return res;
58      }
59      double** a = A.arr, ** b = B.arr;
60      double** res = allocate_memory(n, m);
61      // calculations
62      for (size_t i = 0; i < n; i++) {
63          for (size_t j = 0; j < m; j++) {
64              res[i][j] = 0;
65              for (size_t k = 0; k < l; k++) {
66                  res[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
67              }
68          }
69      }
70      matrix matr = {n, m, res};
71      return matr;
72  }

```