

```

import numpy as np

A = np.array([[65,72], [72,82]])
A_T = A.transpose()

l = np.linalg.eigvals(np.matmul(A_T, A))

np.linalg.eig(np.matmul(A, A_T))

EigResult(eigenvalues=array([1.0000e+00, 2.1316e+04]),
eigenvectors=array([[-0.74740932, -0.66436384],
       [ 0.66436384, -0.74740932]]))

0.01*21316
213.16

```

#### 4 задача

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import linalg

def create_system(n=100, a=10, b=10):
    """Создание матрицы A и вектора b"""
    A = np.zeros((n, n))
    b_vec = np.arange(1, n+1, dtype=float)

    # Заполнение матрицы A согласно системе уравнений
    for i in range(n):
        if i == 0:
            A[i, 0] = a
            A[i, 1] = 1
            if n > 2:
                A[i, 2] = 1/b
        elif i == n-1:
            A[i, n-2] = 1
            A[i, n-1] = a
        elif i == n-2:
            A[i, n-3] = 1
            A[i, n-2] = a
            A[i, n-1] = 1
        else:
            A[i, i-1] = 1
            A[i, i] = a
            A[i, i+1] = 1
            if i + 2 < n:
                A[i, i+2] = 1/b

    return A, b_vec

```

```

def minimal_residual_method(A, b, eps=1e-15, max_iter=10000):
    '''Метод минимальных невязок'''
    n = len(b)
    x = np.zeros(n)
    r = b - A @ x
    b_norm = np.linalg.norm(b)

    tau_history = []
    residual_history = []

    print(f"Начальная невязка: {np.linalg.norm(r)/b_norm:.2e}")

    for k in range(max_iter):
        Ar = A @ r

        # Оптимальный параметр τ
        numerator = np.dot(r, Ar)
        denominator = np.dot(Ar, Ar)

        if abs(denominator) < 1e-15:
            break

        tau_k = numerator / denominator
        tau_history.append(tau_k)

        # Коррекция решения
        x = x + tau_k * r

        # Обновление невязки
        r = r - tau_k * Ar

        # Проверка сходимости
        residual_norm = np.linalg.norm(r)
        relative_residual = residual_norm / b_norm
        residual_history.append(relative_residual)

        if k % 100 == 0:
            print(f"Итерация {k}: невязка = {relative_residual:.2e}, τ = {tau_k:.6f}")

        if relative_residual < eps:
            print(f"Достигнута точность на итерации {k}")
            break

    return x, tau_history, residual_history, k+1

# def minimal_residual_method_extended_precision(A, b, eps=1e-15, max_iter=50000):
#     """Метод с расширенной диагностикой"""

```

```

#      n = len(b)
#      x = np.zeros(n, dtype=np.float64)
#      r = b - A @ x
#      b_norm = np.linalg.norm(b)

#      tau_history = []
#      residual_history = []
#      solution_change_history = []

#      print(f"Целевая точность: {eps:.1e}")

#      for k in range(max_iter):
#          Ar = A @ r

#          numerator = np.dot(r, Ar)
#          denominator = np.dot(Ar, Ar)

#          tau_k = numerator / denominator
#          tau_history.append(tau_k)

#          x_prev = x.copy()
#          x = x + tau_k * r
#          r = r - tau_k * Ar

#          residual_norm = np.linalg.norm(r)
#          relative_residual = residual_norm / b_norm
#          residual_history.append(relative_residual)

#          # Изменение решения
#          dx_norm = np.linalg.norm(x - x_prev) / max(1,
#          np.linalg.norm(x))
#          solution_change_history.append(dx_norm)

#          # Проверяем несколько критериев остановки
#          stop_reason = ""
#          if relative_residual < eps:
#              stop_reason = "достигнута требуемая невязка"
#          elif dx_norm < 1e-16: # Решение перестало меняться
#              stop_reason = "решение перестало меняться"
#          elif k > 100 and abs(tau_k - tau_history[-1]) < 1e-16: # τ
#              стабилизировался
#              stop_reason = "параметр τ стабилизировался"

#          if stop_reason and relative_residual < 1e-10:
#              print(f"Остановка на итерации {k}: {stop_reason}")
#              print(f"Финальная невязка: {relative_residual:.2e}")
#              print(f"Изменение решения: {dx_norm:.2e}")
#              break

```

```

#         if k == max_iter - 1:
#             print(f"Достигнут максимум итераций: {max_iter}")

#     return x, tau_history, residual_history,
solution_change_history, k+1

# minimal_residual_method_extended_precision(A, b)

def power_method(A, eps=1e-15, max_iter=1000):
    """Степенной метод для λ_max"""
    n = A.shape[0]
    v = np.random.rand(n)
    v = v / np.linalg.norm(v)

    lambda_prev = 0

    for i in range(max_iter):
        Av = A @ v
        lambda_est = np.dot(v, Av)
        v_new = Av / np.linalg.norm(Av)

        # Критерий остановки по изменению λ
        if abs(lambda_est - lambda_prev) < eps:
            break

        lambda_prev = lambda_est
        v = v_new

    return lambda_est

def inverse_power_method(A, eps=1e-15, max_iter=1000):
    """Обратные итерации для λ_min"""
    n = A.shape[0]
    v = np.random.rand(n)
    v = v / np.linalg.norm(v)

    lambda_prev = 0

    try:
        # Используем LU-разложение для эффективного решения
        LU = linalg.lu_factor(A)

        for i in range(max_iter):
            # Решаем A*v_new = v
            v_new = linalg.lu_solve(LU, v)
            lambda_est = np.linalg.norm(v_new)
            v_new = v_new / lambda_est

            # λ_min ≈ 1/||v_new||

```

```

lambda_min_est = 1 / lambda_est

if i > 0 and abs(lambda_min_est - lambda_prev) < eps:
    break

lambda_prev = lambda_min_est
v = v_new

return lambda_min_est

except:
    # Если LU-разложение не работает, используем прямой метод
    print("LU-разложение не удалось, используем прямой метод")
    try:
        A_inv = np.linalg.inv(A)
        return power_method(A_inv) # λ_min = 1/λ_max(A_inv)
    except:
        # Если и это не работает, используем встроенную функцию
        eigvals = np.linalg.eigvals(A)
        return np.min(np.abs(eigvals))

def estimate_condition_number(A):
    """Оценка числа обусловленности"""
    print("Вычисление λ_max...")
    lambda_max = power_method(A)
    print(f"λ_max = {lambda_max:.6f}")

    print("Вычисление λ_min...")
    lambda_min = inverse_power_method(A)
    print(f"λ_min = {lambda_min:.6f}")

    kappa = lambda_max / lambda_min
    return kappa, lambda_max, lambda_min

# Основная программа
print("Создание системы...")
A, b = create_system()

print(f"Размер матрицы: {A.shape}")
print(f"Норма матрицы A: {np.linalg.norm(A):.6f}")

# Оценка числа обусловленности
print("\nОценка числа обусловленности...")
kappa, lambda_max, lambda_min = estimate_condition_number(A)
print(f"Число обусловленности κ(A) ≈ {kappa:.2f}")

# Решение методом минимальных невязок
print("\nРешение методом минимальных невязок...")
x_sol, tau_hist, res_hist, iterations = minimal_residual_method(A, b,
eps=1e-15)

```

```

print(f"\nРезультаты:")
print(f"Всего итераций: {iterations}")
print(f"Финальная относительная невязка: {res_hist[-1]:.2e}")
print(f"Норма решения: {np.linalg.norm(x_sol):.6f}")

# Проверка решения
residual_check = np.linalg.norm(b - A @ x_sol) / np.linalg.norm(b)
print(f"Проверка невязки: {residual_check:.2e}")

# Построение графиков
plt.figure(figsize=(15, 5))

plt.subplot(1, 3, 1)
plt.plot(tau_hist)
plt.xlabel('Номер итерации k')
plt.ylabel('τ_k')
plt.title('Зависимость τ_k от номера итерации')
plt.grid(True)

plt.subplot(1, 3, 2)
plt.semilogy(res_hist)
plt.xlabel('Номер итерации k')
plt.ylabel('Относительная невязка')
plt.title('Сходимость метода')
plt.grid(True)

plt.subplot(1, 3, 3)
plt.plot(x_sol)
plt.xlabel('Компонента i')
plt.ylabel('x[i]')
plt.title('Полученное решение')
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

# Анализ поведения τ_k
print("\nАнализ поведения τ_k:")
print(f"Начальное значение τ: {tau_hist[0]:.6f}")
print(f"Конечное значение τ: {tau_hist[-1]:.6f}")
print(f"Среднее значение τ: {np.mean(tau_hist):.6f}")
print(f"Стандартное отклонение τ: {np.std(tau_hist):.6f}")

# Теоретическое значение τ для сходимости
tau_theoretical = 2 / (lambda_max + lambda_min)
print(f"Теоретическое оптимальное τ: {tau_theoretical:.6f}")

Создание системы...
Размер матрицы: (100, 100)

```

Норма матрицы A: 100.990000

Оценка числа обусловленности...

Вычисление  $\lambda_{\max}$ ...

$\lambda_{\max} = 12.097604$

Вычисление  $\lambda_{\min}$ ...

$\lambda_{\min} = 8.102266$

Число обусловленности  $\kappa(A) \approx 1.49$

Решение методом минимальных невязок...

Начальная невязка: 1.00e+00

Итерация 0: невязка = 1.56e-02,  $\tau = 0.082849$

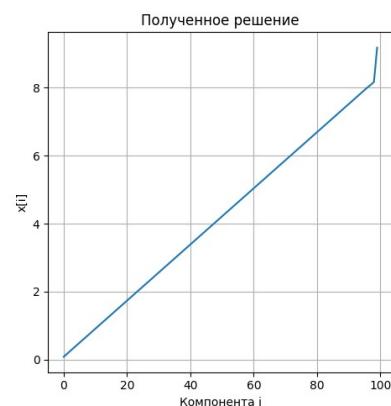
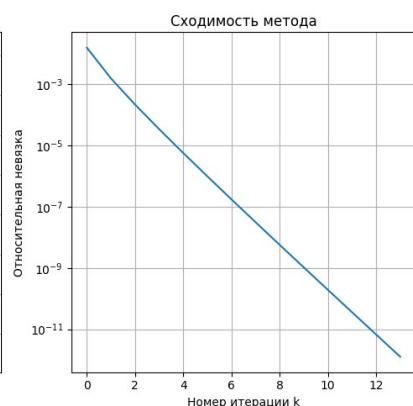
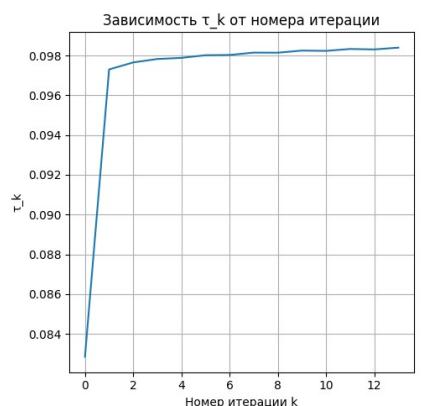
Результаты:

Всего итераций: 15

Финальная относительная невязка: 1.26e-12

Норма решения: 48.224797

Проверка невязки: 1.26e-12



Анализ поведения  $\tau_k$ :

Начальное значение  $\tau$ : 0.082849

Конечное значение  $\tau$ : 0.098393

Среднее значение  $\tau$ : 0.096951

Стандартное отклонение  $\tau$ : 0.003922

Теоретическое оптимальное  $\tau$ : 0.099011