

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ

Скибицький Нікіта

8 січня 2019 р.

У ваших руках конспект лекцій з нормативного курсу “Диференціальні рівняння” прочитаного проф., д.ф.-м.н. Хусаїновим Денисом Ях’евичем на другому курсі спеціальності “прикладна математика” факультету комп’ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка восени 2017-го та навесні 2018-го року.

Конспект у компактній формі відображає матеріал курсу, допомагає сформулювати загальне уявлення про предмет вивчення, правильно зорієнтуватися в даній галузі знань. Конспект лекцій з названої дисципліни сприятиме більш успішному вивченню дисципліни, причому більшою мірою для студентів заочної форми, екстернату, дистанційного та індивідуального навчання.

Комп’ютерний набір та верстка – Скибицький Нікіта Максимович.

Зміст

1	Диференціальні рівняння першого порядку	4
1.1	Рівняння зі змінними, що розділяються	5
1.1.1	Загальна теорія	5
1.1.2	Рівняння, що зводяться до рівнянь зі змінними, що розділяються	6
1.1.3	Вправи для самостійної роботи	7
1.2	Однорідні рівняння	9
1.2.1	Загальна теорія	9
1.2.2	Рівняння, що зводяться до однорідних	10
1.2.3	Вправи для самостійної роботи	12
1.3	Лінійні рівняння першого порядку	15
1.3.1	Загальна теорія	15
1.3.2	Рівняння Бернуллі	17
1.3.3	Рівняння Рікатті	17
1.3.4	Вправи для самостійної роботи	18
1.4	Рівняння в повних диференціалах	21
1.4.1	Загальна теорія	21
1.4.2	Множник, що інтегрує	23
1.4.3	Вправи для самостійної роботи	24
1.5	Диференціальні рівняння першого порядку, не розв'язані відносно похідної	27
1.5.1	Частинні випадки рівнянь, що інтегруються в квадратурах	27
1.5.2	Вправи для самостійної роботи	31
1.6	Існування та єдиність розв'язків диференціальних рівнянь першого порядку. Неперервна залежність та диференційованість	36
1.6.1	Особливі розв'язки	42
1.6.2	Вправи для самостійної роботи	43
2	Нелінійні диференціальні рівняння вищих порядків	46
2.1	Загальні визначення. Існування та єдиність розв'язків рівнянь	46
2.2	Диференціальні рівняння вищих порядків, що інтегруються в квадратурах	47

Вступ

Наведемо декілька основних визначень теорії диференціальних рівнянь, що будуть використовуватися надалі.

Визначення. Рівняння, що містять похідні від шуканої функції та можуть містити шукану функцію та незалежну змінну, називаються диференціальними рівняннями.

Визначення. Якщо в диференціальному рівнянні невідомі функції є функціями однієї змінної

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0, \quad (0.1)$$

то диференціальне рівняння називається звичайним.

Визначення. Якщо невідома функція, що входить в диференціальне рівняння, є функцією двох або більшої кількості незалежних змінних

$$F\left(x, y, z, \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \dots, \frac{\partial^k z}{\partial x^\ell \partial y^{k-\ell}}, \dots, \frac{\partial^n z}{\partial y^n}\right) = 0 \quad (0.2)$$

то диференціальне рівняння називається рівнянням в частинних похідних.

Визначення. Порядком диференціального рівняння називається максимальний порядок похідної від невідомої функції, що входить в диференціальне рівняння.

Визначення. Розв'язком диференціального рівняння називається функція, що має необхідну ступінь гладкості, і яка при підстановці в диференціальне рівняння обертає його в тотожність.

Визначення. Процес знаходження розв'язку диференціального рівняння називається інтегруванням диференціального рівняння.

1 Диференціальні рівняння першого порядку

Рівняння першого порядку, що розв'язане відносно похідної, має вигляд

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y). \quad (1.1)$$

Диференціальне рівняння становить зв'язок між координатами точки та кутовим коефіцієнтом дотичної $\frac{dy}{dx}$ до графіку розв'язку в цій же точці. Якщо знати x та y , то можна обчислити $f(x, y)$ тобто $\frac{dy}{dx}$.

Таким чином, диференціальне рівняння визначає поле напрямків, і задача інтегрування рівнянь зводиться до знаходження кривих, що зветься інтегральними кривими, напрям дотичних до яких в кожній точці співпадає з напрямом поля.

1.1 Рівняння зі змінними, що розділяються

1.1.1 Загальна теорія

Рівняння вигляду

$$\frac{dy}{dx} = f(x) \cdot g(y), \quad (1.1.1)$$

або більш загального вигляду

$$f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot dx + g_1(x) \cdot g_2(y) \cdot dy = 0 \quad (1.1.2)$$

називаються рівняннями зі змінними, що розділяються. Розділимо його на $f_2(y) \cdot g_1(x)$ і одержимо

$$\frac{f_1(x)}{g_1(x)} \cdot dx + \frac{g_2(y)}{f_2(y)} \cdot dy = 0. \quad (1.1.3)$$

Взявши інтеграли, отримаємо

$$\int \frac{f_1(x)}{g_1(x)} \cdot dx + \int \frac{g_2(y)}{f_2(y)} \cdot dy = C, \quad (1.1.4)$$

або

$$\Phi(x, y) = C. \quad (1.1.5)$$

Визначення. Кінцеве рівняння (1.1.5), що визначає розв'язок диференціального рівняння як неявну функцію від x , називається інтегралом розглянутого рівняння.

Визначення. Рівняння (1.1.5), що визначає всі без винятку розв'язки даного диференціального рівняння, називається загальним інтегралом.

Бувають випадки (в основному), що невизначені інтеграли з (1.1.3) не можна записати в елементарних функціях. Незважаючи на це, задача

інтегрування вважається виконаною. Кажуть, що диференціальне рівняння розв'язане в квадратурах.

Можливо, що (1.1.5) розв'язується відносно y :

$$y = y(x, C). \quad (1.1.6)$$

Тоді, завдяки вибору C , можна одержати всі розв'язки.

Визначення. Залежність (1.1.6), що тотожно задовольняє вихідному диференціальному рівнянню, де C – довільна стала, називається загальним розв'язком диференціального рівняння.

Геометрично загальний розв'язок являє собою сім'ю кривих, що не перетинаються, які заповнюють деяку область. Іноді треба виділити одну криву сім'ї, що проходить через задану точку $M(x_0, y_0)$.

Визначення. Знаходження розв'язку $y = y(x)$, що проходить через задану точку $M(x_0, y_0)$, називається розв'язком задачі Коші.

Визначення. Розв'язок, який записаний у вигляді $y = y(x, x_0, y_0)$ і задовольняє умові $y(x, x_0, y_0) = y_0$, називається розв'язком у формі Коші.

1.1.2 Рівняння, що зводяться до рівнянь зі змінними, що розділяються

Розглянемо рівняння вигляду

$$\frac{dy}{dx} = f(ax + by + c) \quad (1.1.7)$$

де a, b, c – сталі.

Зробимо заміну $ax + by + c = z$. Тоді

$$a \cdot dx + b \cdot dy = dz, \quad \frac{dy}{dx} = \frac{1}{b} \cdot \left(\frac{dz}{dx} - a \right). \quad (1.1.8)$$

Підставивши в (1.1.7), одержимо

$$\frac{1}{b} \cdot \left(\frac{dz}{dx} - a \right) = f(z), \quad (1.1.9)$$

або

$$\frac{dz}{dx} = a + b \cdot f(z), \quad (1.1.10)$$

Розділивши змінні, запишемо

$$\frac{dz}{a + b \cdot f(z)} - dx = 0 \quad (1.1.11)$$

і

$$\int \frac{dz}{a + b \cdot f(z)} - x = C. \quad (1.1.12)$$

Загальний інтеграл має вигляд $\Phi(ax + by + c, x) = C$.

1.1.3 Вправи для самостійної роботи

Рівняння зі змінними, що розділяються можуть бути записані у вигляді

$$y' = f(x) \cdot g(y)$$

або

$$f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot dx + g_1(x) \cdot g_2(y) \cdot dy.$$

Для розв'язків такого рівняння необхідно обидві частини помножити або розділити на такий вираз, щоб в одну частину входило тільки x , а в другу – тільки y . Тоді обидві частини рівняння можна проінтегрувати.

Якщо ділити на вираз, що містить x та y , може бути загублений розв'язок, що обертає цей вираз в нуль.

Приклад 1.1.1. Розв'язати рівняння

$$x^2 y^2 y' + y = 1.$$

Розв'язок. Підставивши $y = \frac{dy}{dx}$ в рівняння, отримаємо

$$x^2 y^2 \cdot \frac{dy}{dx} + y = 1.$$

Помножимо обидві частини рівняння на dx і розділимо на $x^2 \cdot (y - 1)$. Перевіримо, що $y = 1$ при цьому є розв'язком, а $x = 0$ цим розв'язком не є:

$$\frac{y^2}{y - 1} \cdot dy = -\frac{dx}{x^2}.$$

Проінтегруємо обидві частини рівняння:

$$\int \frac{y^2}{y - 1} \cdot dy = - \int \frac{dx}{x^2}.$$
$$\frac{y^2}{2} + y + \ln|y - 1| = \frac{1}{x} + C$$

Приклад 1.1.2. Розв'язати рівняння

$$y' = \sqrt{4x + 2y - 1}.$$

Розв'язок. Введемо заміну змінних $z = 4x + 2y - 1$. Тоді $x' = 4 + 2y'$. Рівняння перетвориться до вигляду

$$\begin{aligned} z' - 4 &= 2\sqrt{z} \\ z' &= 4 + 2\sqrt{z} \\ \frac{dz}{2 + \sqrt{z}} &= 2 dx. \end{aligned}$$

Проінтегруємо обидві частини рівняння:

$$\int \frac{dz}{2 + \sqrt{z}} = \int 2 dx$$

Обчислимо інтеграл, що стоїть зліва. При обчисленні будемо використовувати таку заміну:

$$\sqrt{z} = t, \quad dz = 2t dt, \quad 2 + \sqrt{z} = 2 + t,$$

$$\begin{aligned} \int \frac{dz}{2 + \sqrt{z}} &= \int \frac{2t dt}{2 + t} = 2 \int \frac{t + 2 - 2}{t + 2} \cdot dt = \\ &= 2t - 4 \ln |2 + t| = 2\sqrt{z} - 4 \ln (2 + \sqrt{z}). \end{aligned}$$

Після інтегрування отримаємо

$$2\sqrt{z} - 4 \ln (2 + \sqrt{z}) = 2x + 2C.$$

Зробимо обернену заміну, $z = 4x + 2y - 1$:

$$\sqrt{4x + 2y - 1} - 2 \ln (2 + \sqrt{4x + 2y - 1}) = x + C.$$

Розв'язати рівняння:

Задача 1.1.3.

$$xy \cdot dx + (x + 1) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.1.5.

$$y' = 10^{x+y};$$

Задача 1.1.4.

$$x \cdot (1 + y) \cdot dx = y \cdot (1 + x^2) \cdot dy;$$

Задача 1.1.6.

$$y' - xy^2 = 2xy;$$

Задача 1.1.7.

$$\sqrt{y^2 + 1} \, dx = xy \cdot dy;$$

Задача 1.1.8.

$$y' = x \tan(y);$$

Задача 1.1.9.

$$yy' + x = 1;$$

Задача 1.1.10.

$$3y^2 y' + 15x = 2xy^3;$$

Задача 1.1.11.

$$y' = \cos(y - x);$$

Задача 1.1.12.

$$y' - y = 2x - 3;$$

Задача 1.1.13.

$$xy' + y = y^2;$$

Задача 1.1.14.

$$e^{-y} \cdot (1 + y') = 1;$$

Задача 1.1.15.

$$2x^2 y' + y^2 = 2;$$

Задача 1.1.16.

$$y' - xy^3 = 2xy^2.$$

Знайти частинні розв'язки, що задовольняють заданим початковим умовам:

Задача 1.1.17.

$$(x^2 - 1) \cdot y' + 2xy^2 = 0, \quad y(0) = 1;$$

Задача 1.1.18.

$$y' \cdot \cot(x) + y = 2, \quad y(0) = -1;$$

Задача 1.1.19.

$$y' = 3\sqrt[3]{y^2}, \quad y(2) = 0.$$

1.2 Однорідні рівняння

1.2.1 Загальна теорія

Нехай рівняння має вигляд

$$M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy = 0. \quad (1.2.1)$$

Якщо функції $M(x, y)$ та $N(x, y)$ однорідні одного ступеня, то рівняння називається однорідним. Нехай функції $M(x, y)$ та $N(x, y)$ однорідні ступеня k , тобто

$$M(t \cdot x, t \cdot y) = t^k \cdot M(x, y), \quad N(t \cdot x, t \cdot y) = t^k \cdot N(x, y). \quad (1.2.2)$$

Робимо заміну

$$y = ux, \quad dy = u dx + x du. \quad (1.2.3)$$

Після підстановки одержуємо

$$M(x, ux) \cdot dx + N(x, ux) \cdot (u dx + x du) = 0, \quad (1.2.4)$$

або

$$x^k M(1, u) \cdot dx + x^k N(1, u) \cdot (u dx + x du) = 0. \quad (1.2.5)$$

Скоротивши на x^k і розкривши дужки, запишемо

$$M(1, u) \cdot dx + N(1, u) \cdot u dx + N(1, u) \cdot x du = 0. \quad (1.2.6)$$

Згрупувавши, одержимо рівняння зі змінними, що розділяються

$$(M(1, u) + N(1, u) \cdot u) dx + N(1, u) \cdot x du = 0, \quad (1.2.7)$$

або

$$\int \frac{dx}{x} + \int \frac{N(1, u) \cdot du}{M(1, u) + N(1, u) \cdot u} = C. \quad (1.2.8)$$

Взявши інтеграли та замінивши $u = y/x$, отримаємо загальний інтеграл $\Phi(x, y/x) = C$.

1.2.2 Рівняння, що зводяться до однорідних

Нехай маємо рівняння вигляду

$$\frac{dy}{dx} = f\left(\frac{a_1x + b_1y + c_1}{a_2x + b_2y + c_2}\right). \quad (1.2.9)$$

Розглянемо два випадки

1.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \neq 0. \quad (1.2.10)$$

Тоді система алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1 = 0, \\ a_2x + b_2y + c_2 = 0, \end{cases} \quad (1.2.11)$$

має єдиний розв'язок (x_0, y_0) . Проведемо заміну

$$\begin{cases} x = x_1 + x_0, \\ y = y_1 + y_0 \end{cases} \quad (1.2.12)$$

та отримаємо

$$\begin{aligned}\frac{dy_1}{dx_1} &= f\left(\frac{a_1 \cdot (x_1 + x_0) + b_1 \cdot (y_1 + y_0) + c_1}{a_2 \cdot (x_1 + x_0) + b_2 \cdot (y_1 + y_0) + c_2}\right) = \\ &= f\left(\frac{a_1 x_1 + b_1 y_1 + (a_1 x_0 + b_1 y_0 + c_1)}{a_2 x_1 + b_2 y_1 + (a_2 x_0 + b_2 y_0 + c_2)}\right)\end{aligned}\quad (1.2.13)$$

Оскільки (x_0, y_0) – розв’язок (1.2.11), то (1.2.9) набуде вигляду

$$\frac{dy_1}{dx_1} = f\left(\frac{a_1 x_1 + b_1 y_1}{a_2 x_1 + b_2 y_1}\right)\quad (1.2.14)$$

і є однорідним нульового ступеня. Робимо заміну

$$y_1 = ux_1, \quad dy_1 = u \cdot dx_1 + x_1 \cdot du.\quad (1.2.15)$$

Підставимо в (1.2.14)

$$u + x_1 \cdot \frac{du}{dx_1} = f\left(\frac{a_1 x_1 + b_1 ux_1}{a_2 x_1 + b_2 ux_1}\right).\quad (1.2.16)$$

Одержимо

$$x_1 \cdot du + \left(u - f\left(\frac{a_1 x_1 + b_1 ux_1}{a_2 x_1 + b_2 ux_1}\right)\right) dx_1 = 0.\quad (1.2.17)$$

Розділивши змінні, маємо

$$\int \frac{du}{u - f\left(\frac{a_1 x_1 + b_1 ux_1}{a_2 x_1 + b_2 ux_1}\right)} + \ln(x_1) = C.\quad (1.2.18)$$

І загальний інтеграл диференціального рівняння має вигляд $\Phi(u, x_1) = C$. Повернувшись до вихідних змінних, запишемо

$$\Phi\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}, x - x_0\right) = C.\quad (1.2.19)$$

2. Нехай

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = 0,\quad (1.2.20)$$

тобто коефіцієнти рядків лінійно залежні і

$$a_1 x + b_1 y = \alpha \cdot (a_2 x + b_2 y).\quad (1.2.21)$$

Робимо заміну $a_2x + b_2y = z$. Звідси $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{b_2} \cdot \left(\frac{dz}{dx} - a_2\right)$.

Підставивши в диференціальне рівняння, одержимо

$$\frac{1}{b_2} \cdot \left(\frac{dz}{dx} - a_2\right) = f\left(\frac{\alpha z + c_1}{z + c_2}\right), \quad (1.2.22)$$

або

$$\frac{dz}{dx} = a_2 + b_2 \cdot f\left(\frac{\alpha z + c_1}{z + c_2}\right), \quad (1.2.23)$$

Розділивши змінні, отримаємо

$$\int \frac{dz}{a_2 + b_2 \cdot f\left(\frac{\alpha z + c_1}{z + c_2}\right)} - x = C, \quad (1.2.24)$$

Загальний інтеграл має вигляд $\Phi(a_2x + b_2y, x) = C$

1.2.3 Вправи для самостійної роботи

Однорідні рівняння можуть бути записані у вигляді

$$y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

або

$$M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy = 0,$$

де $M(x, y)$ і $N(x, y)$ – однорідні функції одного й того ж ступеня. Для того, щоб розв'язати однорідне рівняння, необхідно провести заміну

$$y = ux, \quad dy = u \cdot dx + x \cdot du,$$

в результаті якої отримаємо рівняння зі змінними, що розділяються.

Приклад 1.2.1. Розв'язати рівняння $x \cdot dy = (x + y) \cdot dx$.

Розв'язок. Дане рівняння однорідне, оскільки x та $x + y$ є однорідними функціями першого ступеня.

Проведемо заміну: $y = ux$. Тоді $dy = u \, dx + x \, du$. Підставивши y та dy в задане рівняння, отримаємо

$$\begin{aligned} x \cdot (x \, du + u \, dx) &= (x + xu) \, dx, \\ x^2 \, du &= x \, dx \end{aligned}$$

Розв'яжемо це рівняння зі змінними, що розділяються:

$$\begin{aligned} du &= \frac{dx}{x}, \\ u &= \ln|x| + C. \end{aligned}$$

Повернувшись до вихідних змінних $u = y/x$, отримаємо

$$y = x \cdot (\ln|x| + C).$$

Крім того розв'язком є $x = 0$, що було загублене при поділенні рівняння на x .

Розв'язати рівняння:

Задача 1.2.2.

$$(x + 2y) \cdot dx - x \, dy = 0;$$

Задача 1.2.3.

$$(x - y) \cdot dx + (x + y) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.2.4.

$$y^2 + x^2 y' = x y y';$$

Задача 1.2.5.

$$(x^2 + y^2) \cdot y' = 2xy;$$

Задача 1.2.6.

$$x y' - y = x \cdot \tan\left(\frac{y}{x}\right);$$

Задача 1.2.7.

$$x y' = y - x e^{y/x};$$

Задача 1.2.8.

$$x y' - y = (x + y) \cdot \ln\left(\frac{x + y}{x}\right);$$

Задача 1.2.9.

$$(3x + y) \cdot dx - (2x + 3y) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.2.10.

$$x y' = y \cos\left(\ln\left(\frac{y}{x}\right)\right);$$

Задача 1.2.11.

$$(y + \sqrt{xy}) \cdot dx = x \, dy;$$

Задача 1.2.12.

$$x y' = \sqrt{x^2 - y^2} + y;$$

Задача 1.2.13.

$$x^2 y' = y \cdot (x + y);$$

Задача 1.2.14.

$$y \cdot (-y + x y') = \sqrt{x^4 + y^4};$$

Задача 1.2.15.

$$x \, dy - y \, dx = \sqrt{x^2 + y^2} \, dx;$$

Задача 1.2.16.

$$(y^2 - 2xy) \cdot dx + x^2 \cdot dy = 0;$$

Задача 1.2.17.

$$2x^3y' = y \cdot (2x^2 - y^2);$$

Задача 1.2.18.

$$(x - y \cos(y/x)) dx + x \cos(y/x) dy = 0;$$

Задача 1.2.19.

$$y'(xy - x^2) = y^2;$$

Задача 1.2.20.

$$2xyy' = x^2 + y^2;$$

Задача 1.2.21.

$$(6x + 3y) \cdot dx = (7x - 2y) \cdot dy;$$

Задача 1.2.22.

$$y^2x dx = y \cdot (xy - 2y^2) \cdot dy;$$

Задача 1.2.23.

$$x^2y dx = y \cdot (xy - 2y^2) \cdot dy;$$

Задача 1.2.24.

$$2y^3 = xy' \cdot (2y^2 - x^2);$$

Задача 1.2.25.

$$(x + \sqrt{xy}) \cdot dy = y dx;$$

Задача 1.2.26.

$$y = \left(\sqrt{y^2 - x^2} + x \right) y';$$

Задача 1.2.27.

$$(3x - 2y) \cdot dx - (2x + y) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.2.28.

$$(7x + 6y) \cdot dx - (x + 3y) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.2.29.

$$xy' = y + x \cdot \cot\left(\frac{y}{x}\right).$$

Знайти частинні розв'язки, що задовольняють задані початкові умови:

Задача 1.2.30.

$$xy' = 4\sqrt{2x^2 + y^2} + y, \quad y(1) = 2;$$

Задача 1.2.31.

$$(2y^2 + 3x^2) \cdot xy' = 3y^3 + 6yx^2, \quad y(2) = 1;$$

Задача 1.2.32.

$$y'(x^2 - 2xy) = x^2 + xy - y^2, \quad y(3) = 0;$$

Задача 1.2.33.

$$2y' = \frac{y^2}{x^2} + 8 \cdot \frac{y}{x} + 8, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.34.

$$y'(x^2 - 4xy) = x^2 + xy - 3y^2, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.35.

$$xy' = 3\sqrt{2x^2 + y^2} + y, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.36.

$$(2y^2 + 7x^2) \cdot xy' = 3y^3 + 14yx^2, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.37.

$$2y' = \frac{y^2}{x^2} + 6 \cdot \frac{y}{x} + 3, \quad y(3) = 1;$$

Задача 1.2.38.

$$x^2y' = y^2 + 4xy + 2x^2, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.39.

$$xy' = \sqrt{2x^2 + y^2} + y, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.40.

$$xy' = 3\sqrt{x^2 + y^2} + y, \quad y(3) = 4;$$

Задача 1.2.41.

$$xy' = 2\sqrt{x^2 + y^2} + y, \quad y(4) = 3;$$

Задача 1.2.42.

$$2y' = \frac{y^2}{x^2} + 8 \cdot \frac{y}{x} + 8, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.2.43.

$$y' = \frac{x + 2y}{2x - y}, \quad y(3) = 8.$$

1.3 Лінійні рівняння першого порядку

1.3.1 Загальна теорія

Рівняння, що є лінійним відносно невідомої функції та її похідної, називається лінійним диференціальним рівнянням. Його загальний вигляд такий:

$$\frac{dy}{dx} + p(x) \cdot y = q(x). \quad (1.3.1)$$

Якщо $q(x) \equiv 0$, тобто рівняння має вигляд

$$\frac{dy}{dx} + p(x) \cdot y = 0, \quad (1.3.2)$$

то воно зветься однорідним. Однорідне рівняння є рівнянням зі змінними, що розділяються і розв'язується таким чином:

$$\frac{dy}{y} = -p(x) \cdot dx, \quad (1.3.3)$$

$$\int \frac{dy}{y} = - \int p(x) \cdot dx, \quad (1.3.4)$$

$$\ln y = - \int p(x) \cdot dx + \ln C. \quad (1.3.5)$$

Нарешті

$$y = C \cdot \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} \quad (1.3.6)$$

Розв'язок неоднорідного рівняння будемо шукати методом варіації довільних сталих (методом невизначених множників Лагранжа). Він складається в тому, що розв'язок неоднорідного рівняння шукається в такому ж вигляді, як і розв'язок однорідного, але C вважається невідомою функцією від x , тобто $C = C(x)$ і

$$y = C(x) \cdot \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} \quad (1.3.7)$$

Для знаходження $C(x)$ підставимо y у рівняння

$$\begin{aligned} \frac{dC(x)}{dx} \cdot \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} &= -C(x) \cdot p(x) \cdot \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} + \\ &+ p(x) \cdot C(x) \cdot \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} = q(x). \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

Звідси

$$dC(x) = q(x) \cdot \exp \left\{ \int p(x) \cdot dx \right\} \cdot dx. \quad (1.3.9)$$

Проінтегрувавши, одержимо

$$C(x) = \int q(x) \cdot \exp \left\{ \int p(x) \cdot dx \right\} \cdot dx + C. \quad (1.3.10)$$

І загальний розв'язок неоднорідного рівняння має вигляд

$$y = \exp \left\{ - \int p(x) \cdot dx \right\} \cdot$$

$$\cdot \left(\int q(x) \cdot \exp \left\{ \int p(x) \cdot dx \right\} \cdot dx + C \right). \quad (1.3.11)$$

Якщо використовувати початкові умови $y(x_0) = y_0$, то розв'язок можна записати у формі Коші:

$$y(x, x_0, y_0) = \exp \left\{ - \int_{x_0}^x p(t) \cdot dt \right\} \cdot \left(\int_{x_0}^x q(t) \cdot \exp \left\{ \int_t^x p(\xi) \cdot d\xi \right\} \cdot dt + y_0 \right). \quad (1.3.12)$$

1.3.2 Рівняння Бернуллі

Рівняння вигляду

$$\frac{dy}{dx} + p(x) \cdot y = q(x) \cdot y^m, \quad m \neq 1 \quad (1.3.13)$$

називається рівнянням Бернуллі. Розділимо на y^m і одержимо

$$y^{-m} \cdot \frac{dy}{dx} + p(x) \cdot y^{1-m} = q(x). \quad (1.3.14)$$

Зробимо заміну:

$$y^{1-m} = z, \quad (1-m) \cdot y^{-m} \cdot \frac{dy}{dx} = dz. \quad (1.3.15)$$

Підставивши в рівняння, отримаємо

$$\frac{1}{1-m} \cdot \frac{dz}{dx} + p(x) \cdot z = q(x). \quad (1.3.16)$$

Одержали лінійне диференціальне рівняння. Його розв'язок має вигляд

$$z = \exp \left\{ -(1-m) \cdot \int p(x) dx \right\} \cdot \left((1-m) \cdot \int q(x) \cdot \exp \left\{ (1-m) \cdot \int p(x) dx \right\} + C \right). \quad (1.3.17)$$

1.3.3 Рівняння Рікатті

Рівняння вигляду

$$\frac{dy}{dx} + p(x) \cdot y + r(x) \cdot y^2 = q(x) \quad (1.3.18)$$

називається рівнянням Рікатті. В загальному випадку рівняння Рікатті не інтегрується. Відомі лише деякі частинні випадки рівнянь Рікатті, що інтегруються в квадратурах. Розглянемо один з них. Нехай відомий один частинний розв'язок $y = y_1(x)$. Робимо заміну $y = y_1(x) + z$ і одержуємо

$$\frac{dy_1(x)}{dx} + \frac{dz}{dx} + p(x) \cdot (y_1(x) + z) + r(x) \cdot (y_1(x) + z)^2 = q(x). \quad (1.3.19)$$

Оскільки $y_1(x)$ – частинний розв'язок, то

$$\frac{dy_1(x)}{dx} + p(x) \cdot y_1 + r(x) \cdot y_1^2 = q(x). \quad (1.3.20)$$

Розкривши в (1.3.19) скобки і використовуючи (1.3.20), одержуємо

$$\frac{dz}{dx} + p(x) \cdot z + 2r(x) \cdot y_1(x) \cdot z + r(x) \cdot z^2 = 0. \quad (1.3.21)$$

Перепишемо одержане рівняння у вигляді

$$\frac{dz}{dx} + (p(x) + 2r(x) \cdot y_1(x)) \cdot z = -r(x) \cdot z^2, \quad (1.3.22)$$

це рівняння Бернуллі з $m = 2$.

1.3.4 Вправи для самостійної роботи

Приклад 1.3.1. Розв'язати рівняння

$$y' - y \cdot \tan x = \cos x.$$

Розв'язок. Використовуючи вигляд загального розв'язку, отримаємо

$$y = \exp \left\{ \int \tan x \, dx \right\} \cdot \left(\int \exp \left\{ - \int \tan x \, dx \right\} \cdot \cos x \, dx + C \right).$$

Оскільки

$$\int \tan x \, dx = -\ln |\cos x|,$$

то отримаємо

$$\begin{aligned} y &= e^{-\ln |\cos x|} \cdot \left(\int e^{\ln |\cos x|} \cdot \cos x \, dx + C \right) = \\ &= \frac{1}{\cos x} \cdot \left(\int \cos^2 x \, dx + C \right) = \\ &= \frac{1}{\cos x} \cdot \left(\frac{x}{2} + \frac{\sin 2x}{4} + C \right). \end{aligned}$$

Або

$$y = \frac{C}{\cos x} + \frac{x}{2 \cos x} + \frac{\sin x}{2}.$$

Приклад 1.3.2. Знайти частинний розв'язок рівняння

$$y' - \frac{y}{x} = x^2,$$

що задовольняє початковій умові $y(2) = 2$.

Розв'язок. Використовуючи вигляд загального розв'язку, отримаємо

$$\begin{aligned} y &= \exp \left\{ \int \frac{1}{x} dx \right\} \cdot \left(\int \exp \left\{ - \int \frac{1}{x} dx \right\} \cdot x^2 dx + C \right) = \\ &= e^{\ln |x|} \cdot \left(\int e^{-\ln |x|} \cdot x^2 dx + C \right) = \\ &= x \cdot \left(\int x dx + C \right) = \\ &= x \cdot \left(\frac{x^2}{2} + C \right). \end{aligned}$$

Таким чином

$$y = Cx + \frac{x^3}{2}.$$

Підставивши початкові умови $y(2) = 2$, одержимо $2 = 2C + 4$. Звідси $C = -1$ і частинний розв'язок має вигляд

$$y_{\text{част.}} = \frac{x^3}{2} - x.$$

Розв'язати рівняння:

Задача 1.3.3.

$$xy' + (x+1) \cdot y = 3x^2 e^{-x};$$

Задача 1.3.4.

$$(2x+1) \cdot y' = 4x + 2y;$$

Задача 1.3.5.

$$y' = 2x \cdot (x^2 + y);$$

Задача 1.3.6.

$$x^2 y' + xy + 1 = 0;$$

Задача 1.3.7.

$$y' + y \cdot \tan x = \sec x;$$

Задача 1.3.8.

$$x \cdot (y' - y) = e^x;$$

Задача 1.3.9.

$$(xy' - 1) \cdot \ln x = 2y;$$

Задача 1.3.10.

$$(y + x^2) \cdot dx = x \cdot dy;$$

Задача 1.3.11.

$$(2e^x - y) \cdot dx = dy;$$

Задача 1.3.12.

$$\sin^2 y + x \cdot \cot y = \frac{1}{y^2};$$

Задача 1.3.14.

$$(3e^y - x) \cdot y' = 1;$$

Задача 1.3.13.

$$(x + y^2) \cdot y' = y;$$

Задача 1.3.15.

$$y = x \cdot (y' - x \cdot \cos x).$$

Знайти частинні розв'язки рівняння з заданими початковими умовами:

Задача 1.3.16.

$$y' - \frac{y}{x} = -\frac{\ln x}{x}, \quad y(1) = 1;$$

Задача 1.3.17.

$$y' - \frac{2xy}{1+x^2} = 1+x^2, \quad y(1) = 3;$$

Задача 1.3.18.

$$y' - \frac{2y}{x+1} = e^x \cdot (x+1)^2, \quad y(0) = 1;$$

Задача 1.3.19.

$$xy' + 2y = x64, \quad y(1) = -\frac{5}{8};$$

Задача 1.3.20.

$$y' - \frac{y}{x} = x \cdot \sin x, \quad y\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1;$$

Задача 1.3.21.

$$y' + \frac{y}{x} = \sin x, \quad y(\pi) = \frac{1}{\pi};$$

Задача 1.3.22.

$$(13y^3 - x) \cdot y' = 4y, \quad y(5) = 1;$$

Задача 1.3.23.

$$2 \cdot (x + \ln^2 y - \ln y) \cdot y' = y, \quad y(2) = 1.$$

Розв'язати рівняння Бернуллі:

Задача 1.3.24.

$$y' + xy = (1+x) \cdot e^{-x} \cdot y^2;$$

Задача 1.3.25.

$$xy' + y = 2y^2 \cdot \ln x;$$

Задача 1.3.26.

$$2 \cdot (2xy' + y) = xy^2;$$

Задача 1.3.27.

$$3 \cdot (xy' + y) = y^2 \cdot \ln x;$$

Розв'язати рівняння Рікатті:

Задача 1.3.29.

$$x^2 \cdot y' + xy + x^2 y^2 = 4;$$

Задача 1.3.30.

$$3y' + y^2 + \frac{2}{x} = 0;$$

Задача 1.3.31.

$$xy' - (2x + 1) \cdot y + y^2 = 5 - x^2;$$

Задача 1.3.28.

$$2 \cdot (y' + y) = xy^2.$$

Задача 1.3.32.

$$y' - 2xy + y^2 = 5 - x^2;$$

Задача 1.3.33.

$$y' + 2y \cdot e^x - y^2 = e^{2x} + e^x.$$

1.4 Рівняння в повних диференціалах

1.4.1 Загальна теорія

Якщо ліва частина диференціального рівняння

$$M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy = 0, \quad (1.4.1)$$

є повним диференціалом деякої функції $u(x, y)$, тобто

$$du(x, y) = M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy, \quad (1.4.2)$$

і, таким чином, (1.4.1) набуває вигляду $du(x, y) = 0$ то рівняння називається рівнянням в повних диференціалах. Звідси вираз

$$u(x, y) = C \quad (1.4.3)$$

є загальним інтегралом диференціального рівняння.

Критерієм того, що рівняння є рівнянням в повних диференціалах, тобто необхідною та достатньою умовою, є виконання рівності

$$\frac{\partial M(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial N(x, y)}{\partial x}. \quad (1.4.4)$$

Нехай маємо рівняння в повних диференціалах. Тоді

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} = M(x, y), \quad \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = N(x, y). \quad (1.4.5)$$

Звідси $u(x, y) = \int M(x, y) dx + \varphi(y)$ де $\varphi(y)$ – невідома функція. Для її визначення продиференціюємо співвідношення по y і прирівняємо $N(x, y)$:

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\int M(x, y) dx \right) + \frac{d\varphi(y)}{dy} = N(x, y). \quad (1.4.6)$$

Звідси

$$\varphi(y) = \int \left(N(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int M(x, y) dx \right) \right) dy. \quad (1.4.7)$$

Остаточно, загальний інтеграл має вигляд

$$\int M(x, y) dx + \int \left(N(x, y) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int M(x, y) dx \right) \right) dy = C. \quad (1.4.8)$$

Як відомо з математичного аналізу, якщо відомий повний диференціал (1.4.2), то $u(x, y)$ можна визначити, взявши криволінійний інтеграл по довільному контуру, що з'єднує фіксовану точку (x_0, y_0) і точку із змінними координатами (x, y) .

Більш зручно брати криву, що складається із двох відрізків прямих. В цьому випадку криволінійний інтеграл розпадається на два простих інтеграла

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy = \\ &= \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y_0)} M(x, y) \cdot dx + \int_{(x, y_0)}^{(x, y)} N(x, y) \cdot dy = \\ &= \int_{x_0}^x M(\xi, y_0) \cdot d\xi + \int_{y_0}^y N(x, \eta) \cdot d\eta. \end{aligned} \quad (1.4.9)$$

В цьому випадку одразу одержуємо розв'язок задачі Коші.

$$\int_{x_0}^x M(\xi, y_0) \cdot d\xi + \int_{y_0}^y N(x, \eta) \cdot d\eta = 0. \quad (1.4.10)$$

1.4.2 Множник, що інтегрує

В деяких випадках рівняння (1.4.1) не є рівнянням в повних диференціалах, але існує функція $\mu = \mu(x, y)$ така, що рівняння

$$\mu(x, y) \cdot M(x, y) \cdot dx + \mu(x, y) \cdot N(x, y) \cdot dy = 0, \quad (1.4.11)$$

вже буде рівнянням в повних диференціалах. Необхідною та достатньою умовою цього є рівність

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu(x, y) \cdot M(x, y)) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu(x, y) \cdot N(x, y)), \quad (1.4.12)$$

або

$$\frac{\partial \mu}{\partial y} \cdot M + \mu \cdot \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial \mu}{\partial x} \cdot N + \mu \cdot \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (1.4.13)$$

Таким чином замість звичайного диференціального рівняння відносно функції $y(x)$ одержимо диференціальне рівняння в частинних похідних відносно функції $\mu(x, y)$.

Задача інтегрування його значно спрощується, якщо відомо в якому вигляді шукати функцію $\mu(x, y)$, наприклад $\mu = \mu(\omega(x, y))$ де $\omega(x, y)$ – відома функція. В цьому випадку одержуємо

$$\frac{\partial \mu}{\partial y} = \frac{d\mu}{d\omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y}, \quad \frac{\partial \mu}{\partial x} = \frac{d\mu}{d\omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (1.4.14)$$

Після підстановки в (1.4.13) маємо

$$\frac{d\mu}{d\omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y} \cdot M + \mu \cdot \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{d\mu}{d\omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot N + \mu \cdot \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (1.4.15)$$

або

$$\frac{d\mu}{d\omega} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot N - \frac{\partial \omega}{\partial y} \cdot M \right) = \mu \left(\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x} \right). \quad (1.4.16)$$

Розділимо змінні

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{\frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot N - \frac{\partial \omega}{\partial y} \cdot M} \cdot d\omega. \quad (1.4.17)$$

Проінтегрувавши і поклавши сталу інтегрування одиницею, одержимо:

$$\mu(\omega(x, y)) = \exp \left\{ \int \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{\frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot N - \frac{\partial \omega}{\partial y} \cdot M} \cdot d\omega \right\}. \quad (1.4.18)$$

Розглянемо частинні випадки.

1. Нехай $\omega(x, y) = x$. Тоді $\frac{\partial \omega}{\partial x} = 1$, $\frac{\partial \omega}{\partial y} = 0$, $d\omega = dx$ і формула має вигляд

$$\mu(\omega(x, y)) = \exp \left\{ \int \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{N} \cdot dx \right\}. \quad (1.4.19)$$

2. Нехай $\omega(x, y) = y$. Тоді $\frac{\partial \omega}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial \omega}{\partial y} = 1$, $d\omega = dy$ і формула має вигляд

$$\mu(\omega(x, y)) = \exp \left\{ \int \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{-M} \cdot dy \right\}. \quad (1.4.20)$$

3. Нехай $\omega(x, y) = x^2 \pm y^2$. Тоді $\frac{\partial \omega}{\partial x} = 2x$, $\frac{\partial \omega}{\partial y} = \pm 2y$, $d\omega = d(x^2 \pm y^2)$ і формула має вигляд

$$\mu(\omega(x, y)) = \exp \left\{ \int \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{2xN \mp 2yM} \cdot d(x^2 \pm y^2) \right\}. \quad (1.4.21)$$

4. Нехай $\omega(x, y) = xy$. Тоді $\frac{\partial \omega}{\partial x} = y$, $\frac{\partial \omega}{\partial y} = x$, $d\omega = d(xy)$ і формула має вигляд

$$\mu(\omega(x, y)) = \exp \left\{ \int \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{yN - xM} \cdot d(xy) \right\}. \quad (1.4.22)$$

1.4.3 Вправи для самостійної роботи

Як вже було сказано, рівняння

$$M(x, y) \cdot dx + N(x, y) \cdot dy = 0$$

буде рівнянням в повних диференціалах, якщо його ліва частина є повним диференціалом деякої функції. Це має місце при

$$\frac{\partial M(x, y)}{\partial y} = \frac{\partial N(x, y)}{\partial x}.$$

Приклад 1.4.1. Розв'язати рівняння

$$(2x + 3x^2y) \cdot dx + (x^3 - 3y^2) \cdot dy = 0.$$

Розв'язок. Перевіримо, що це рівняння є рівнянням в повних диференціалах. Обчислимо

$$\frac{\partial}{\partial y}(2x + 3x^2y) = 3x^2, \quad \frac{\partial}{\partial x}(x^3 - 3y^2) = 3x^2.$$

Таким чином існує функція $u(x, y)$, що

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} = 2x + 3x^2y.$$

Проінтегруємо по x . Отримаємо

$$u(x, y) = \int (2x + 3x^2y) \cdot dx + \Phi(y) = x^2 + x^3y + \Phi(y).$$

Для знаходження функції $\Phi(y)$ візьмемо похідну від $u(x, y)$ по y і порівняємо до $x^3 - 3y^2$. Отримаємо

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial y} = x^3 + \Phi'(y) = x^3 - 3y^2.$$

Звідси $\Phi'(y) = -3y^2$ і $\Phi(y) = -y^3$. Таким чином,

$$u(x, y) = x^2 + x^3y - y^3$$

і загальний інтеграл диференціального рівняння має вигляд

$$x^2 + x^3y - y^3 = C.$$

Перевірити, що дані рівняння є рівняннями в повних диференціалах, і розв'язати їх:

Задача 1.4.2.

$$2xy \cdot dx + (x^2 - y^2) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.3.

$$(2 - 9xy^2) \cdot x \cdot dx + (4y^2 - 6x^3) \cdot y \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.4.

$$e^{-y} \cdot dx - (2y + x \cdot e^{-y}) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.5.

$$\frac{y}{x} \cdot dx + (y^3 + \ln x) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.6.

$$\frac{3x^2 + y^2}{y^2} \cdot dx - \frac{2x^3 + 5y}{y^3} \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.7.

$$2x \cdot \left(1 + \sqrt{x^2 - y}\right) \cdot dx - \sqrt{x^2 - y} \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.8.

$$(1 + y^2 \cdot \sin 2x) \cdot dx - 2y \cdot \cos^2 x \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.9.

$$3x^2 \cdot (1 + \ln y) \cdot dx = \left(2y - \frac{x^3}{y}\right) \cdot dy;$$

Задача 1.4.10.

$$\left(\frac{x}{\sin y} + 2\right) \cdot dx + \frac{(x^2 + 1) \cdot \cos y}{\cos 2y - 1} \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.11.

$$(2x + y \cdot e^{xy}) \cdot dx + (x \cdot e^{xy} + 3y^2) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.12.

$$\left(2 + \frac{1}{x^2 + y^2}\right) \cdot x \cdot dx + \frac{y}{x^2 + y^2} \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.13.

$$\left(3y^2 - \frac{y}{x^2 + y^2}\right) \cdot dx + \left(6xy + \frac{x}{x^2 + y^2}\right) \cdot dy = 0.$$

Розв'язати, використовуючи множник, що інтегрує:

Задача 1.4.14. $\mu = \mu(x - y)$,

$$(2x^3 + 3x^2y + y^2 - y^3) \cdot dx + (2y^3 + 3xy^2 + x^2 - x^3) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.15.

$$\left(y - \frac{ay}{x} + x\right) \cdot dx + a \cdot dy = 0, \quad \mu = \mu(x + y);$$

Задача 1.4.16.

$$(x^2 + y) \cdot dy + x \cdot (1 - y) \cdot dx = 0, \quad \mu = \mu(xy);$$

Задача 1.4.17.

$$(x^2 - y^2 + y) \cdot dx + x \cdot (2y - 1) \cdot dy = 0;$$

Задача 1.4.18.

$$(2x^2y^2 + y) \cdot dx + (x^3y - x) \cdot dy = 0.$$

1.5 Диференціальні рівняння першого порядку, не розв'язані відносно похідної

Диференціальне рівняння першого порядку, не розв'язане відносно похідної, має такий вигляд

$$F(x, y, y') = 0. \quad (1.5.1)$$

1.5.1 Частинні випадки рівнянь, що інтегруються в квадратах

Розглянемо ряд диференціальних рівнянь, що інтегруються в квадратах.

1. Рівняння вигляду

$$F(y') = 0. \quad (1.5.2)$$

Нехай алгебраїчне рівняння $F(k) = 0$ має принаймні один дійсний корінь $k = k_0$. Тоді, інтегруючи $y' = k_0$, одержимо $y = k_0 \cdot x + C$. Звідси $k_0 = (y - C)/x$ і вираз

$$F\left(\frac{y - C}{x}\right) = 0 \quad (1.5.3)$$

містить всі розв'язки вихідного диференціального рівняння.

2. Рівняння вигляду

$$F(x, y') = 0. \quad (1.5.4)$$

Нехай це рівняння можна записати у параметричному вигляді

$$\begin{cases} x = \varphi(t), \\ y' = \psi(t). \end{cases} \quad (1.5.5)$$

Використовуючи співвідношення $dy = y' \cdot dx$, одержимо

$$dy = \psi(t) \cdot \varphi'(t) \cdot dt. \quad (1.5.6)$$

Проінтегрувавши, запишемо

$$y = \int \psi(t) \cdot \varphi'(t) \cdot dt + C. \quad (1.5.7)$$

І загальний розв'язок в параметричній формі має вигляд

$$\begin{cases} x = \varphi(t), \\ y = \int \psi(t) \cdot \varphi'(t) \cdot dt + C. \end{cases} \quad (1.5.8)$$

3. Рівняння вигляду

$$F(y, y') = 0. \quad (1.5.9)$$

Нехай це рівняння можна записати у параметричному вигляді

$$\begin{cases} y = \varphi(t), \\ y' = \psi(t). \end{cases} \quad (1.5.10)$$

Використовуючи співвідношення $dy = y' \cdot dx$, одержимо

$$\varphi'(t) \cdot dt = \psi(t) \cdot dx \quad (1.5.11)$$

і

$$dx = \frac{\varphi'(t)}{\psi(t)} \cdot dt \quad (1.5.12)$$

Проінтегрувавши, запишемо

$$x = \int \frac{\varphi'(t)}{\psi(t)} \cdot dt + C. \quad (1.5.13)$$

І загальний розв'язок в параметричній формі має вигляд

$$\begin{cases} x = \int \frac{\varphi'(t)}{\psi(t)} \cdot dt + C, \\ y = \varphi(t). \end{cases} \quad (1.5.14)$$

4. Рівняння Лагранжа

$$y = \varphi(y') \cdot x + \psi(y'). \quad (1.5.15)$$

Введемо параметр $y' = \frac{dy}{dx} = p$ і отримаємо

$$y = \varphi(p) \cdot x + \psi(p). \quad (1.5.16)$$

Продиференціювавши, запишемо

$$dy = \varphi'(p) \cdot x \cdot dp + \varphi(p) \cdot dx + \psi'(p) \cdot dp. \quad (1.5.17)$$

Замінивши $dy = p \cdot dx$ одержимо

$$p \cdot dx = \varphi'(p) \cdot x \cdot dp + \varphi(p) \cdot dx + \psi'(p) \cdot dp. \quad (1.5.18)$$

Звідси

$$(p - \varphi(p)) \cdot dx - \varphi'(p) \cdot x \cdot dp = \psi'(p) \cdot dp. \quad (1.5.19)$$

І отримали лінійне неоднорідне диференціальне рівняння

$$\frac{dx}{dp} + \frac{\varphi'(p)}{\varphi(p) - p} \cdot x = \frac{\varphi'(p)}{p - \varphi(p)}. \quad (1.5.20)$$

Його розв'язок

$$\begin{aligned} x = \exp \left\{ \int \frac{\varphi'(p)}{p - \varphi(p)} \cdot dp \right\} \cdot \\ \cdot \left(\int \frac{\varphi'(p)}{p - \varphi(p)} \cdot \exp \left\{ \int \frac{\varphi'(p)}{\varphi(p) - p} \cdot dp \right\} dp + C \right) = \\ = \Psi(p, C). \end{aligned} \quad (1.5.21)$$

І остаточний розв'язок рівняння Лагранжа в параметричній формі запишеться у вигляді

$$\begin{cases} x = \Psi(p, C), \\ y = \varphi(p) \cdot \Phi(p, C) + \psi(p). \end{cases} \quad (1.5.22)$$

5. Рівняння Клеро.

Частинним випадком рівняння Лагранжа, що відповідає $\varphi(y') = y'$ є рівняння Клеро

$$y = y'x + \psi(y'). \quad (1.5.23)$$

Поклавши $y' = \frac{dy}{dx} = p$, отримаємо $y = px + \psi(p)$. Продиференціюємо

$$dy = p \cdot dx + x \cdot dp + \psi'(p) \cdot dp. \quad (1.5.24)$$

Оскільки $dy = p \cdot dx$, то

$$p \cdot dx = p \cdot dx + x \cdot dp + \psi'(p) \cdot dp. \quad (1.5.25)$$

Скоротивши, одержимо

$$(x + \psi'(p)) \cdot dp = 0. \quad (1.5.26)$$

Можливі два випадки.

(а) $x + \psi'(p) = 0$ і розв'язок має вигляд

$$\begin{cases} x = -\psi'(p), \\ y = -p \cdot \psi'(p) + \psi(p). \end{cases} \quad (1.5.27)$$

(б) $dp = 0$, $p = C$ і розв’язок має вигляд

$$y = Cx + \psi(C). \quad (1.5.28)$$

Загальним розв’язком рівняння Клеро буде сім’я “прямих” (1.5.28). Цю сім’ю огинає особлива крива (1.5.27).

6. Параметризація загального вигляду. Нехай диференціальне рівняння $F(x, y, y') = 0$ вдалося записати у вигляді системи рівнянь з двома параметрами

$$x = \varphi(u, v), \quad y = \psi(u, v), \quad y' = \theta(u, v). \quad (1.5.29)$$

Використовуючи співвідношення $dy = y' \cdot dx$, одержимо

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi(u, v)}{\partial u} \cdot du + \frac{\partial \psi(u, v)}{\partial v} \cdot dv = \\ = \theta(u, v) \cdot \left(\frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial u} \cdot du + \frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial v} \cdot dv \right) \end{aligned} \quad (1.5.30)$$

Перегрупувавши члени, одержимо

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \psi(u, v)}{\partial u} - \theta(u, v) \cdot \frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial u} \right) du = \\ = \left(\theta(u, v) \cdot \frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial v} - \frac{\partial \psi(u, v)}{\partial v} \right) dv. \end{aligned} \quad (1.5.31)$$

Звідси

$$\frac{du}{dv} = \frac{\theta(u, v) \cdot \frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial v} - \frac{\partial \psi(u, v)}{\partial v}}{\frac{\partial \psi(u, v)}{\partial u} - \theta(u, v) \cdot \frac{\partial \varphi(u, v)}{\partial u}}. \quad (1.5.32)$$

Або отримали рівняння вигляду

$$\frac{du}{dv} = f(u, v). \quad (1.5.33)$$

Параметризація загального вигляду не дає інтеграл диференціального рівняння. Вона дозволяє звести диференціальне рівняння, не розв’язане відносно похідної, до диференціального рівняння, розв’язаного відносно похідної.

7. Нехай рівняння $F(x, y, y') = 0$ можна розв’язати відносно y' і воно має n коренів, тобто його можна записати у вигляді

$$\prod_{i=1}^n (y' - f_i(x, y)) = 0. \quad (1.5.34)$$

Розв'язавши кожне з рівнянь $y' = f_i(x, y)$, $i = \overline{1, n}$, отримаємо n загальних розв'язків (або інтервалів) $y = \varphi_i(x, C)$, $i = \overline{1, n}$ (або $\varphi_i(x, y) = C$, $i = \overline{1, n}$). І загальний розв'язок вихідного рівняння, не розв'язаного відносно похідної має вигляд

$$\prod_{i=1}^n (y - \varphi_i(x, C)) = 0, \quad (1.5.35)$$

або

$$\prod_{i=1}^n (\varphi_i(x, y) - C) = 0. \quad (1.5.36)$$

1.5.2 Вправи для самостійної роботи

1. Розв'язати рівняння вигляду $F(y') = 0$:

Приклад 1.5.1. $(y')^3 - 1 = 0$;

Розв'язок. Рівняння має дійсний розв'язок, тобто воно поставлене коректно. Тому його розв'язком буде $\left(\frac{y-C}{x}\right)^3 - 1 = 0$.

Задача 1.5.2.

Задача 1.5.3.

$$(y')^2 - 2y' + 1 = 0;$$

$$(y')^4 - 16 = 0.$$

2. Розв'язати рівняння вигляду $F(x, y') = 0$:

Приклад 1.5.4. $x = (y')^3 + y'$;

Розв'язок. Робимо параметризацію $y' = t$, $x = t^3 + t$. Використовуючи основну форму запису $dy = y' \cdot dx$ одержимо

$$dy = t \cdot (3t^2 + 1) \cdot dt.$$

Звідси

$$y = \int t \cdot (3t^2 + 1) \cdot dt = \frac{3t^4}{4} + \frac{t^2}{2} + C.$$

Остаточний розв'язок у параметричній формі має вигляд

$$x = t^3 + t, \quad y = \frac{3t^4}{4} + \frac{t^2}{2} + C.$$

Задача 1.5.5.

$$x \cdot ((y')^2 - 1) = 2y';$$

Задача 1.5.6.

$$x = y' \cdot \sqrt{(y')^2 - 1};$$

Задача 1.5.7.

$$y' \cdot (x - \ln y') - 1.$$

3. Розв'язати рівняння вигляду $F(y, y') = 0$:

Приклад 1.5.8. $y = (y')^2 + 2(y')^3$;

Розв'язок. Робимо параметризацію $y' = t$, $y = t^2 + 2t^3$. Використовуючи основну форму запису $dy = y' \cdot dx$, одержуємо

$$(2t + 6t^2) \cdot dt = t \cdot dx.$$

Звідси

$$dx = (2 + 6t) \cdot dt, \quad x = \int (2 + 6t) \cdot dt = 2t + 3t^2 + C.$$

Остаточний розв'язок у параметричній формі має вигляд

$$x = 2t + 3t^2, \quad y = t^2 + 2t$$

Крім того за рахунок скорочення втрачено $y \equiv 0$.

Задача 1.5.9.

$$y = \ln(1 + (y')^2);$$

Задача 1.5.11.

$$(y')^4 - (y')^2 = y^2.$$

Задача 1.5.10.

$$y = (y' - 1) \cdot e^{y'};$$

4. Розв'язати рівняння Лагранжа

Приклад 1.5.12. $y = -xy' + 4\sqrt{y'}$;

Розв'язок. Робимо параметризацію $y' = t$, $y = -xt + 4\sqrt{t}$. Диференціюємо друге рівняння.

$$dy = -x \cdot dt - t \cdot dx + 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt.$$

Оскільки зроблено заміну $dy = t \cdot dx$, то одержимо

$$t \cdot dx = -x \cdot dt - t \cdot dx + 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt,$$

або

$$2t \cdot dx = -x \cdot dt + 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt.$$

Звідси

$$\frac{dx}{dt} + \frac{x}{2t} = \frac{1}{t \cdot \sqrt{t}}.$$

Розв'язок лінійного неоднорідного рівняння може бути представлений у вигляді

$$\begin{aligned} x &= \exp \left\{ - \int \frac{dt}{2t} \right\} \cdot \left(\int \exp \left\{ \int \frac{dt}{2t} \right\} \cdot \frac{1}{t \cdot \sqrt{t}} + C \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot \left(\int \frac{dt}{t} + C \right) = \frac{\ln |t| + C}{\sqrt{t}}. \end{aligned}$$

Остаточно маємо

$$x = \frac{\ln |t| + C}{\sqrt{t}}, \quad y = -\sqrt{t} \cdot (\ln |t| + C) + 4\sqrt{t}.$$

Крім того при діленні на t втратили $y \equiv 0$.

Задача 1.5.13.

$$y = 2xy' - 4 \cdot (y')^3;$$

Задача 1.5.15.

$$xy' \cdot (y' + 2) = y;$$

Задача 1.5.14.

$$y = x \cdot (y')^2 - 2 \cdot (y')^3;$$

Задача 1.5.16.

$$2xy' - y = \ln y'.$$

5. Розв'язати рівняння Клеро

Приклад 1.5.17. $y = xy' - (y')^2$;

Розв'язок. Робимо параметризацію $y' = t$, $y = xt - t^2$. Диференціюємо друге рівняння:

$$dy = x \cdot dt + t \cdot dx - 2t \cdot dt.$$

Оскільки зроблено заміну $dy = t \cdot dx$, то одержимо

$$t \cdot dx = x \cdot dt + t \cdot dx - 2t \cdot dt.$$

Звідси $(x - 2t) \cdot dt = 0$. І маємо дві гілки

(а) Особливий розв'язок $x = 2t$, $y = t^2$, або $y = \frac{x^2}{4}$.

(б) Загальний розв'язок $y = Cx - C^2$.

Задача 1.5.18.

$$y = xy' + 4\sqrt{y'};$$

Задача 1.5.19.

$$y = xy' + 2 - y';$$

Задача 1.5.20.

$$y = xy' - \ln y';$$

Задача 1.5.21.

$$y = xy' + \sin y';$$

Задача 1.5.22.

$$y = xy' + \sqrt{1 + (y')^2};$$

Задача 1.5.23.

$$y = xy' + (y')^3;$$

Задача 1.5.24.

$$y = xy' + \cos(2 + y');$$

Задача 1.5.25.

$$y = xy' - \ln \sqrt{1 + (y')^2};$$

Задача 1.5.26.

$$y = xy' - y' - (y')^3;$$

Задача 1.5.27.

$$y = xy' - \sqrt{2 - (y')^2};$$

Задача 1.5.28.

$$y = xy' + \sqrt{2y' + 2};$$

Задача 1.5.29.

$$y = xy' - e^{y'};$$

Задача 1.5.30.

$$y = xy' - \tan y';$$

Задача 1.5.31.

$$(y')^3 = 3(xy' - y).$$

6. Розв'язати рівняння параметризацією загального виду

Приклад 1.5.32. $(y')^2 - 2xy' = x^2 - 4y;$

Розв'язок. Введемо параметризацію рівняння

$$x = u, \quad y' = v, \quad y = \frac{u^2 + 2uv - v^2}{4}.$$

Використовуючи співвідношення $dy = y' \cdot dx$, одержимо рівняння

$$\frac{1}{u}(2u \cdot du + 2u \cdot dv + 2v \cdot du - 2v \cdot dv) = v \cdot du.$$

Перепишемо його у вигляді

$$(u + v) \cdot du + (u - v) \cdot dv = 2v \cdot du,$$

або

$$(u - v) \cdot du + (u - v) \cdot dv = 0,$$

Воно розділяється на два

$$(a) \quad du + dv = 0 \implies v = -u + C.$$

Підставивши в параметризовану систему, одержуємо

$$x = u, \quad y = \frac{u^2 + 2u \cdot (-u + C) - (-u + C)^2}{4},$$

або

$$y = \frac{x^2 + 2x \cdot (-x + C) - (-x + C)^2}{4} = \frac{-2x^2 + 4Cx - C^2}{4}.$$

$$(б) \quad u - v = 0 \implies v = u. \text{ І розв'язок має вигляд } y = \frac{x^2}{2}.$$

Задача 1.5.33.

Задача 1.5.36.

$$5y + (y')^2 = x \cdot (x + y');$$

$$y = x \cdot (y')^2 - 2 \cdot (y')^3;$$

Задача 1.5.34.

Задача 1.5.37.

$$x^2 \cdot (y')^2 = xy y' + 1;$$

$$2xy' - y = y' \cdot \ln(y y');$$

Задача 1.5.35.

Задача 1.5.38.

$$(y')^3 + y^2 = xy y';$$

$$y' = e^{xy'/y}.$$

7. Розв'язати рівняння

Приклад 1.5.39. $(y')^2 - y^2 = 0;$

Розв'язок. Це рівняння розв'язується відносно y' . Маємо

$$y' = y, \quad y' = -y.$$

Розв'язок першого має вигляд $y = ce^x$, другого Ce^{-x} . Загальний розв'язок має вигляд

$$(y - ce^x) \cdot (y - Ce^{-x}) = 0.$$

Задача 1.5.40.

$$y^2 \cdot ((y')^2 + 1) = 1;$$

Задача 1.5.41.

$$(y')^2 - 4y^3 = 0;$$

Задача 1.5.42.

$$x \cdot (y')^2 = y;$$

Задача 1.5.43.

$$(y')^2 + xy = y^2 + xy';$$

Задача 1.5.44.

$$xy' \cdot (xy' + y) = 2y^2.$$

1.6 Існування та єдиність розв'язків диференціальних рівнянь першого порядку. Неперервна залежність та диференційованість

Клас диференціальних рівнянь, що інтегруються в квадратурах, досить невеликий, тому мають велике значення наближені методи розв'язку диференціальних рівнянь. Але, щоб використовувати ці методи, треба бути впевненим в існуванні розв'язку шуканого рівняння та в його єдиності.

Зараз значна частина теорем існування та єдиності розв'язків не тільки диференціальних, але й рівнянь інших видів доводиться методом стискаючих відображень.

Визначення. Простір M називається метричним, якщо для довільних двох точок $x, y \in M$ визначена функція $\rho(x, y)$, що задовольняє аксіомам:

1. $\rho(x, y) \geq 0$, причому $\rho(x, y) = 0$ тоді і тільки тоді, коли $x = y$;
2. $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ (комутативність);
3. $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z)$ (нерівність трикутника).

Функція $\rho(x, y)$ називається відстанню в просторі M (метрикою простору M).

Приклад 1.6.1. Векторний n -вимірний простір \mathbb{R}^n .

Нехай $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. За метрику можна взяти:

$$\rho(x, y) = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \right)^{1/2}, \quad (1.6.1)$$

або

$$\rho(x, y) = \max_{i=1, n} |x_i - y_i|. \quad (1.6.2)$$

Приклад 1.6.2. Простір неперервних функцій на відрізку $[a, b]$ позначається $C([a, b])$. За метрику можна взяти

$$\rho(x(t), y(t)) = \left(\int_a^b (x(t) - y(t))^2 dt \right)^{1/2}, \quad (1.6.3)$$

або

$$\rho(x(t), y(t)) = \max_{t \in [a, b]} |x(t) - y(t)|. \quad (1.6.4)$$

Визначення. Послідовність $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ називається фундаментальною, якщо для довільного $\varepsilon > 0$ існує $n \geq N(\varepsilon)$ таке, що при $n \geq N(\varepsilon)$ і довільному $m \in \mathbb{N}$ буде $\rho(x_n, x_{n+m}) < \varepsilon$.

Визначення. Метричний простір M називається повним, якщо довільна фундаментальна послідовність точок $\{x_n\}$ простору M збігається до деякої точки x_0 простору M .

Теорема 1.1 (принцип стискаючих відображень). *Нехай в повному метричному просторі M задано оператор A , що задовольняє умовам.*

1. *Оператор A переводить точки простору M в точки цього ж простору, тобто якщо $x \in M$, то і $Ax \in M$.*
2. *Оператор A є оператором стиску, тобто $\rho(Ax, Ay) \leq \alpha \rho(x, y)$, де $0 < \alpha < 1$, x, y – довільні точки M .*

Тоді існує єдина нерухома точка $\bar{x} \in M$, яка є розв'язком операторного рівняння $A\bar{x} = \bar{x}$ і вона може бути знайдена методом послідовних відображень, тобто $x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$, де $x_{n+1} = Ax_n$, причому x_0 вибирається довільно.

Доведення. Візьмемо довільну точку $x_0 \in M$ і побудуємо послідовність $A^n x_0$. Покажемо, що побудована послідовність є фундаментальною. Дійсно

$$\rho(x_2, x_1) = \rho(Ax_1, Ax_0) \leq \alpha \rho(x_1, x_0), \quad (1.6.5)$$

$$\rho(x_3, x_2) = \rho(Ax_2, Ax_1) \leq \alpha \rho(x_2, x_1) \leq \alpha^2 \rho(x_1, x_0), \quad (1.6.6)$$

$$\rho(x_{n+1}, x_n) = \rho(Ax_n, Ax_{n-1}) \leq \alpha \rho(x_n, x_{n-1}) \leq \dots \leq \alpha^n \rho(x_1, x_0). \quad (1.6.7)$$

Оцінимо $\rho(x_n, x_{n+m})$. Застосувавши $m - 1$ раз нерівність трикутника, отримуємо

$$\rho(x_n, x_{n+m}) \leq \rho(x_n, x_{n+1}) + \rho(x_{n+1}, x_{n+2}) + \dots + \rho(x_{n+m-1}, x_{n+m}) \leq$$

$$\begin{aligned} &\leq \alpha^n \rho(x_1, x_0) + \alpha^{n+1} \rho(x_1, x_0) + \alpha^{n+m-1} \rho(x_1, x_0) = \\ &= (\alpha^n + \alpha^{n+1} + \dots + \alpha^{n+m}) \cdot \rho(x_1, x_0) < \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \cdot \rho(x_1, x_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0. \end{aligned} \quad (1.6.8)$$

Тобто послідовність $\{x_n\}$ є фундаментальною і, в силу повноти простору M , збігається до деякого елемента цього ж простора x .

Покажемо, що x є нерухомою точкою A , тобто $Ax = x$.

Нехай від супротивного $Ax = \bar{x}$ і $x \neq \bar{x}$. Застосувавши нерівність трикутника, одержимо $\rho(x, \bar{x}) < \rho(x, x_{n+1}) + \rho(x_{n+1}, \bar{x})$. Оцінимо кожний з доданків.

1. $\rho(x, x_{n+1}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.
2. $\rho(x_{n+1}, \bar{x}) = \rho(Ax_n, Ax) \leq \alpha \rho(x_n, x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.

Таким чином $\rho(x, \bar{x}) \leq 0$, а в силу невід'ємності метрики це значить, що $x = \bar{x}$.

Покажемо, що нерухома точка єдина. Нехай, від супротивного, існують дві точки x і y : $Ax = x$ і $Ay = y$. Але тоді

$$\rho(x, y) = \rho(Ax, Ay) \leq \alpha \rho(x, y) < \rho(x, y), \quad (1.6.9)$$

що суперечить припущенню про стислість оператора. Таким чином, припущення про неєдиність нерухомої точки помилкове. \square

З використанням теореми про нерухому точку доведемо теорему про існування та єдиність розв'язку задачі Коші диференціального рівняння, розв'язаного відносно похідної.

Теорема 1.2 (про існування та єдиність розв'язку задачі Коші). *Нехай у диференціальному рівнянні $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$ функція $f(x, y)$ визначена в прямокутнику*

$$D = \{(x, y) : x_0 - a \leq x \leq x_0 + a, y_0 - b \leq y \leq y_0 + b\}, \quad (1.6.10)$$

і задовольняє умовам:

1. $f(x, y)$ неперервна по x та y у D ;
2. $f(x, y)$ задовольняє умові Ліпшиця по змінній y , тобто

$$|f(x, y_1) - f(x, y_2)| \leq N \cdot |y_1 - y_2|, \quad N = \text{const}. \quad (1.6.11)$$

Тоді існує єдиний розв'язок $y = y(x)$ диференціального рівняння, який визначений при $x_0 - h \leq x \leq x_0 + h$, і задовольняє умові $y(x_0) = y_0$, де $h < \min\{a, b/M, 1/N\}$, $M = \max_{(x,y) \in D} |f(x, y)|$.

Доведення. Розглянемо простір, елементами якого є функції $y(x)$, неперервні на відрізку $[x_0 - h, x_0 + h]$ й обмежені $|y(x) - y_0| \leq b$. Введемо метрику $\rho(y(x), z(x))$. Одержимо повний метричний простір $C([x_0 - h, x_0 + h])$. Замінімо диференціальне рівняння

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \quad (1.6.12)$$

еквівалентним інтегральним рівнянням

$$y(x) = \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt + y_0 = Ay. \quad (1.6.13)$$

Розглянемо оператор A . Через те, що

$$\left| \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt \right| \leq \int_{x_0}^x |f(t, y(t))| dt \leq M \cdot |x - x_0| \leq Mh \leq b, \quad (1.6.14)$$

то оператор A ставить у відповідність кожній неперервній функції $y(x)$, визначеній при $x \in [x_0 - h, x_0 + h]$ й обмеженій $|y(x) - y_0| \leq b$ також неперервну функцію Ay , визначену при $x \in [x_0 - h, x_0 + h]$ й обмежену $|y(x) - y_0| \leq b$.

Перевіримо, чи є оператор A оператором стиску:

$$\begin{aligned} \rho(Ay, Az) &= \max_{x \in [x_0 - h, x_0 + h]} \left| y_0 + \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dy - y_0 - \int_{x_0}^x f(t, z(t)) dt \right| \leq \\ &\leq \max_{x \in [x_0 - h, x_0 + h]} \int_{x_0}^x |f(t, y(t)) - f(t, z(t))| dt \leq \\ &\leq N \cdot \max_{x \in [x_0 - h, x_0 + h]} \int_{x_0}^x |y(t) - z(t)| dt \leq \\ &\leq N \cdot \max_{x \in [x_0 - h, x_0 + h]} |y(t) - z(t)| \cdot \int_{x_0}^x dt \leq N \cdot \rho(y, z) \cdot h. \end{aligned} \quad (1.6.15)$$

І оскільки $Nh < 1$, то оператор A є оператором стиску. Відповідно до принципу стискаючих відображень операторне рівняння $Ay = y$ має єдиний розв'язок, тобто (1.6.13) чи задача Коші (1.6.12) також має єдиний розв'язок. \square

Зауваження. Умову Ліпшиця можна замінити іншою, більш грубою, але легше перевіряємою умовою існування обмеженої по модулю частинної похідної $f'_y(x, y)$ в області D . Дійсно,

$$|f(x, y_1) - f(x, y_2)| = |f'_y(x, \xi)| \cdot |y_1 - y_2| \leq N \cdot |y_1 - y_2|, \quad (1.6.16)$$

де $N = \max_{(x,y) \in D} |f'_y(x, y)|$.

Використовуючи доведену теорему про існування та єдиність розв'язку задачі Коші розглянемо ряд теорем, що описують якісну поведінку розв'язків.

Теорема 1.3 (про неперервну залежність розв'язків від параметру).
Якщо права частина диференціального рівняння

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y, \mu) \quad (1.6.17)$$

неперервна по μ при $\mu \in [\mu_1, \mu_2]$ і при кожному фіксованому μ задовольняє умовам теореми існування й єдиності, причому стала Ліпшиця N не залежить від μ , то розв'язок $y = y(x, \mu)$, що задовольняє початковій умові $y(x_0) = y_0$, неперервно залежить від μ .

Доведення. Оскільки члени послідовності

$$y_n(x, \mu) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, y_n(t, \mu)) dt \quad (1.6.18)$$

є неперервними функціями змінних x і μ , а стала N не залежить від μ , то послідовність $\{y_n\}$ збігається до y рівномірно по μ . І, як випливає з математичного аналізу, якщо послідовність неперервних функцій збігається рівномірно, то вона збігається до неперервної функції, тобто $y = y(x, \mu)$ – функція, неперервна по μ . \square

Теорема 1.4 (про неперервну залежність від початкових умов). *Нехай виконані умови теореми про існування та єдиність розв'язків рівняння*

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (1.6.19)$$

з початковими умовами $y(x_0) = y_0$. Тоді, розв'язки $y = y(x_0, y_0, x)$, що записані у формі Коші, неперервно залежать від початкових умов.

Доведення. Роблячи заміну $x = y(x_0, y_0, x) - y_0$, $t = x - x_0$ одержимо диференціальне рівняння

$$\frac{dz}{dt} = f(t + x_0, z + y_0) \quad (1.6.20)$$

з нульовими початковими умовами. На підставі попередньої теореми маємо неперервну залежність розв'язків від x_0 , y_0 як від параметрів. \square

Теорема 1.5 (про диференційованість розв'язків). *Якщо в околі точки (x_0, y_0) функція $f(x, y)$ має неперервні змішані похідні до k -го порядку, то розв'язок $y(x)$ рівняння*

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (1.6.21)$$

з початковими умовами $y(x_0) = y_0$ в деякому околі точки (x_0, y_0) буде k разів неперервно диференційований.

Доведення. Підставивши $y(x)$ в рівняння, одержимо тотожність

$$\frac{dy(x)}{dx} \equiv f(x, y(x)), \quad (1.6.22)$$

яку можна диференціювати

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot f. \quad (1.6.23)$$

Якщо $k > 1$, то праворуч функція неперервно диференційована. Продиференціюємо її ще раз

$$\begin{aligned} \frac{d^3y}{dx^3} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \cdot \frac{dy}{dx} + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot \frac{dy}{dx} \right) \cdot f + \\ + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} \right), \end{aligned} \quad (1.6.24)$$

або

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \cdot f + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \cdot f^2 + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot f \right), \quad (1.6.25)$$

Проробивши це k разів, отримаємо твердження теореми. \square

Розглянемо диференціальне рівняння, не розв'язане відносно похідної

$$F(x, y, y') = 0. \quad (1.6.26)$$

Нехай (x_0, y_0) – точка на площині. Підставивши її в рівняння, одержимо відносно y' алгебраїчне рівняння

$$F(x_0, y_0, y') = 0. \quad (1.6.27)$$

Це рівняння має корені y'_0, y'_1, \dots, y'_n . Задача Коші для диференціального рівняння, не розв'язаного відносно похідної, ставиться в такий спосіб.

Потрібно знайти розв'язок $y = y(x)$ (1.6.26), що задовольняє умовам $y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y'_i$, де x_0, y_0 – довільні значення, а y'_i – один з вибраних наперед коренів (1.6.27).

Теорема 1.6 (існування й єдиність розв'язку задачі Коші рівняння, не розв'язаного відносно похідної). *Нехай у замкненому околі точки (x_0, y_0, y'_i) функція $F(x, y, y')$ задовольняє умовам:*

1. $F(x, y, y')$ – неперервна по всіх аргументах;
2. $\frac{\partial F}{\partial y'}$ існує і відмінна від нуля;
3. $\left| \frac{\partial F}{\partial y} \right| \leq N_0$.

Тоді при $x \in [x_0 - h, x_0 + h]$, де h – досить мале, існує єдиний розв'язок $y = y(x)$ рівняння $F(x, y, y') = 0$, що задовольняє початковій умові $y(x_0) = y_0$, $y'(x_0) = y'_i$.

Доведення. Як випливає з математичного аналізу відповідно до теореми про неявну функцію можна стверджувати, що умови 1) і 2) гарантують існування єдиної неперервної в околі точки (x_0, y_0, y'_i) функції $y' = f(x, y)$, обумовленої рівнянням $F(x, y, y') = 0$, для якої $y'(x_0) = y'_i$. Перевіримо, чи задовольняє $f(x, y)$ умові Ліпшиця чи більш грубій $\left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \leq N$. Диференціюємо $F(x, y, y') = 0$ по y . Оскільки $y' = f(x, y)$, то одержуємо

$$\frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial y'} \cdot \frac{\partial f}{\partial y} = 0. \quad (1.6.28)$$

Звідси

$$\frac{\partial f}{\partial y} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{\frac{\partial F}{\partial y'}} \quad (1.6.29)$$

З огляду на умови 2), 3), одержимо, що в деякому околі точки (x_0, y_0) буде $\left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \leq N$ і для рівняння $y' = f(x, y)$ виконані умови теореми існування й єдиності розв'язку задачі Коші. \square

1.6.1 Особливі розв'язки

Визначення. Розв'язок $y = \varphi(x)$ диференціального рівняння, в кожній точці якого $M(x, y)$ порушена єдиність розв'язку задачі Коші, називається особливим розв'язком.

Очевидно, особливі розв'язки треба шукати в тих точках області D , де порушені умови теореми про існування й єдиність розв'язку задачі Коші. Але, оскільки умови теореми носять достатній характер, то їхнє не виконання для існування особливих розв'язків, носить необхідний характер. І точки $N(x, y)$ області D , у яких порушені умови теореми про

існування та єдиність розв'язку диференціального рівняння, є лише "підозрілими" на особливі розв'язки.

Розглянемо рівняння

$$y' = f(x, y). \quad (1.6.30)$$

Неперервність $f(x, y)$ в області D зазвичай виконується, і особливі розв'язки варто шукати там, де $\frac{\partial f}{\partial y} = +\pm \infty$.

Для диференціального рівняння, не розв'язаного відносно похідної

$$F(x, y, y') = 0, \quad (1.6.31)$$

умови неперервності $F(x, y, y')$ й обмеженості $\frac{\partial F}{\partial y}$ зазвичай виконуються. І особливі розв'язки варто шукати там, де задовольняється (1.6.31) і

$$\frac{\partial F(x, y, y')}{\partial y'} = 0. \quad (1.6.32)$$

Вилучаючи із системи y' , одержимо $\Phi(x, y) = 0$. Однак не в кожній точці $M(x, y)$, у якій $\Phi(x, y)$, порушується єдиність розв'язку, тому що умови теореми мають лише достатній характер і не є необхідними. Якщо ж яка-небудь гілка $y = \varphi(x)$ кривої $\Phi(x, y)$ є інтегральною кривою, то $y = \varphi(x)$ називається особливим розв'язком.

Таким чином, для знаходження особливого розв'язку рівняння треба

1. знайти p -дискримінантну криву, обумовлену рівняннями (1.6.31), (1.6.32).
2. з'ясувати шляхом підстановки чи є серед гілок p -дискримінантної кривої інтегральні криві;
3. з'ясувати чи порушена умова одиницності в точках цих кривих.

1.6.2 Вправи для самостійної роботи

Приклад 1.6.1. Побудувати послідовні наближення $y_0(x)$, $y_1(x)$, $y_2(x)$ для рівняння $y' = x - y^2$, $y(0) = 0$.

Розв'язок. Візьмемо початкову функцію $y_0(0) \equiv 0$. Підставивши в ітераційну залежність

$$y_{n+1}(x) = y(x_0) + \int_{x_0}^x f(s, y_n(s)) \, ds$$

отримаємо

$$y_1(x) = \int_0^x s \, ds = \frac{x^2}{2},$$
$$y_2(x) = \int_0^x (s - y_1^2(s)) \, ds = \int_0^x \left(s - \frac{s^4}{4} \right) \, ds = \frac{x^2}{2} - \frac{x^5}{20}.$$

Побудувати послідовні наближення $y_0(x)$, $y_1(x)$, $y_2(x)$ для рівнянь

Задача 1.6.2.

$$y' = y^2 + 3x^2 - 1, \quad y(0) = 1;$$

Задача 1.6.3.

$$y' = y + e^{y-1}, \quad y(0) = 1;$$

Задача 1.6.4.

$$y' = 1 + x \cdot \sin y, \quad y(\pi) = 2\pi.$$

Приклад 1.6.5. Вказати на проміжок з $a = 1$, $b = 1$, на якому гарантується існування та єдиність розв'язку диференціального рівняння $y' = y^3 + x$, $y(0) = 1$.

Розв'язок. Як впливає з теореми про існування та єдиність розв'язку, проміжок, на якому гарантується існування та єдиність розв'язку задачі Коші дорівнює $h = \min \left\{ a, \frac{b}{M}, \frac{1}{L} \right\}$, де

$$M = \max_{(x,y) \in D} |f(x,y)|, \quad L = \max_{(x,y) \in D} \left| \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \right|.$$

Для цієї задачі отримаємо $D = \{(x,y) : |x| \leq 1, |y| \leq 1\}$, $M = 2$, $L = 3$. Тому $h = 1/3$.

Вказати проміжки, де гарантується існування та єдиність розв'язку задачі Коші рівняння

Задача 1.6.6.

$$y' = y + e^y, \quad x_0 = 0, \quad y_0 = 0, \quad a = 1, \quad b = 2;$$

Задача 1.6.7.

$$y' = 2xy + y^3, \quad x_0 = 1, \quad y_0 = 1, \quad a = 2, \quad b = 1;$$

Задача 1.6.8.

$$y' = 2 + \sqrt[3]{y - 2x}, \quad x_0 = 0, \quad y_0 = 1, \quad a = 1, \quad b = 1.$$

Приклад 1.6.9. Знайти особливий розв'язок рівняння $y' - \sqrt{y}$.

Розв'язок. Особливий розв'язок слід шукати там, де $\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \pm\infty$. Оскільки $\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{2\sqrt{y}}$, то отримаємо $\bar{y}(x) = 0$ – крива, що підозріла на особливу. Перевірка показує, що це дійсно інтегральна крива. Щоб до кінця переконатися, що ця крива особлива, розв'язуємо рівняння

$$y' = \sqrt{y} \implies \frac{dy}{\sqrt{y}} = dx \implies 2\sqrt{y} = x + C \implies y(x) = \frac{(x+C)^2}{4}.$$

Легко переконатися, що $\bar{y}(x) = 0$ є кривою, що огинає сім'ю інтегральних кривих $y(x) = \frac{(x+c)^2}{4}$.

Приклад 1.6.10. Знайти особливий розв'язок рівняння $y = x + y' - \ln y'$.

Розв'язок. Складаємо рівняння p -дискримінантної кривої

$$y = x + p - \ln p, \quad 0 = 1 - \frac{1}{p}.$$

Із другого рівняння $p = 1$. Підставивши в перше, отримаємо, що крива, що є підозрілою як особлива, має вигляд $\bar{y}(x) = x + 1$.

Підставивши у рівняння, отримаємо $x+1 = x+1 - \ln 1$, тобто впевнились, що $\bar{y}(x) = x + 1$ є інтегральною кривою.

Розв'яжемо рівняння методом введення параметру. Його загальний розв'язок має вигляд

$$y = Ce^x - \ln C.$$

Можна переконатися, що $\bar{y}(x) = x + 1$ є кривою, що огинає сім'ю інтегральних кривих.

Щоб перевірити це аналітично, запишемо умову дотику кривої $y = x + 1$ та $y = Ce^x - \ln C$ в точці (x_0, y_0) . Вона має вигляд:

$$\bar{y}(x_0) = y(x_0, C), \quad \bar{y}'(x_0) = y'(x_0, C).$$

Тобто

$$x_0 + 1 = Ce^{x_0} - \ln C, \quad 1 = Ce^{x_0}.$$

З другого рівняння отримаємо $C = e^{-x_0}$. Підставивши у перше рівняння, маємо $x_0 + 1 = 1 - \ln e^{-x_0}$, тобто $x_0 + 1 = x_0 + 1$ – тотожність. Таким чином при кожному x_0 відбувається дотик інтегральних кривих та $\bar{y}(x) = x + 1$, що огинає сім'ю інтегральних кривих.

Знайти особливі розв'язки та зробити рисунок.

Задача 1.6.11.

$$8 \cdot (y')^3 - 27y = 0;$$

Задача 1.6.12.

$$(y' + 1)^3 - 27 \cdot (x + y)^2 = 0;$$

Задача 1.6.13.

$$y^2 \cdot ((y')^2 + 1) = 1;$$

Задача 1.6.14.

$$(y')^2 - 4y^3 = 0.$$

2 Нелінійні диференціальні рівняння вищих порядків

2.1 Загальні визначення. Існування та єдиність розв'язків рівнянь

Диференціальне рівняння n -го порядку має вигляд

$$F(x, y, y', \dots, y^{(n)}) = 0. \quad (2.1.1)$$

Якщо диференціальне рівняння розв'язане відносно старшої похідної, то воно має вигляд

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}) = 0. \quad (2.1.2)$$

Іноді його називають диференціальним рівнянням у нормальній формі. Для диференціального рівняння, розв'язаного відносно похідної, задача Коші ставиться таким чином. Потрібно знайти функцію $y = y(x)$, n разів неперервно диференційовану і таку, що при підстановці в (2.1.2) обертає його в тотожність і задовольняє початковим умовам

$$y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y'_0, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_0^{(n-1)}. \quad (2.1.3)$$

Для диференціального рівняння, не розв'язаного відносно похідної, задача Коші полягає в знаходженні розв'язку $y = y(x)$, що задовольняє початковим даним

$$y(x_0) = y_0, y'(x_0) = y'_0, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_0^{(n-1)}, y^{(n)}(x_0) = y_0^{(n)}, \quad (2.1.4)$$

де значення $x_0, y_0, y'_0, \dots, y_0^{(n-1)}$ довільні, а $y_0^{(n)}$ один з коренів алгебраїчного рівняння

$$F(x_0, y_0, y'_0, \dots, y_0^{(n)}) = 0. \quad (2.1.5)$$

Теорема 2.1 (існування та єдиності розв'язку задачі Коші рівняння, розв'язаного відносно похідної). *Нехай у деякому замкненому околі точки $(x_0, y_0, y'_0, \dots, y_0^{(n-1)})$ функція $f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$ задовольняє умовам:*

1. вона визначена і неперервна по всім змінним;
2. задовольняє умові Ліпшиця по всім змінним, починаючи з другої.

Тоді при $x_0 - h \leq x \leq x_0 + h$, де h – досить мала величина, існує і єдиний розв’язок $y = y(x)$ рівняння (2.1.2), що задовольняє початковим умовам (2.1.3)

Теорема 2.2 (існування та єдиності розв’язку задачі Коші рівняння, не розв’язаного відносно похідної). *Нехай у деяком замкненому околі точки $(x_0, y_0, y'_0, \dots, y_0^{(n-1)}, y_0^{(n)})$ функція $F(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}, y^{(n)})$ задовольняє умовам:*

1. вона визначена і неперервна по всім змінним;
2. її частинні похідні по всім змінним з другої передостанньої обмежені:

$$\left| \frac{\partial F}{\partial y} \right| < M_0, \quad \left| \frac{\partial F}{\partial y'} \right| < M_1, \quad \dots, \quad \left| \frac{\partial F}{\partial y^{(n-1)}} \right| < M_{n-1}. \quad (2.1.6)$$

3. її частинна похідна по останній змінній не обертається на нуль:

$$\left| \frac{\partial F}{\partial y^{(n)}} \right| \neq 0.$$

Тоді при $x_0 - h \leq x \leq x_0 + h$, де h – досить мала величина, існує і єдиний розв’язок $y = y(x)$ рівняння (2.1.1), що задовольняє початковим умовам (2.1.4)

Визначення. Загальним розв’язком диференціального рівняння n -го порядку називається n разів неперервно диференційована функція $y = y(x, C_1, C_2, \dots, C_n)$, що обертає при підстановці рівняння в тотожність, у якій вибором сталих C_1, C_2, \dots, C_n можна одержати розв’язок довільної задачі Коші в області існування та єдиності розв’язків.

2.2 Диференціальні рівняння вищих порядків, що інтегруються в квадратурах

Розглянемо деякі типи диференціальних рівнянь, що інтегруються в квадратурах.

1. Рівняння вигляду

$$y^{(n)} = f(x). \quad (2.2.1)$$

Проінтегрувавши його n разів одержимо загальний розв'язок у вигляді

$$y = \underbrace{\int \cdots \int}_n f(x) \underbrace{dx \cdots dx}_n + C_1 x^{n-1} + C_2 x^{n-2} + \dots + C_{n-1} x + C_n. \quad (2.2.2)$$

Якщо задані умови Коші (2.1.3), то розв'язок має вигляд

$$y = \underbrace{\int_{x_0}^x \cdots \int_{x_0}^x}_n f(t) \underbrace{dt \cdots dt}_n + \frac{y_0}{(n-1)!} \cdot (x-x_0)^{n-1} + \frac{y'_0}{(n-2)!} \cdot (x-x_0)^{n-2} + \dots + y_0^{(n-2)} \cdot (x-x_0) + y_0^{(n-1)}. \quad (2.2.3)$$

2. Рівняння вигляду

$$F(x, y^{(n)}) = 0. \quad (2.2.4)$$

Нехай це рівняння вдалося записати в параметричному вигляді

$$\begin{cases} x = \varphi(t), \\ y^{(n)} = \psi(t). \end{cases} \quad (2.2.5)$$

Використовуючи основне співвідношення $dy^{(n-1)} = y^{(n)} \cdot dx$, одержимо

$$dy^{(n-1)} = \psi(t) \cdot \varphi(t) \cdot dt \quad (2.2.6)$$

Проінтегрувавши його, маємо

$$y^{(n-1)} = \int \psi(t) \cdot \varphi(t) \cdot dt + C_1 = \psi_1(t, C_1). \quad (2.2.7)$$

І одержимо параметричний запис рівняння $(n-1)$ -го порядку:

$$\begin{cases} x = \varphi(t), \\ y^{(n-1)} = \psi_1(t, C_1). \end{cases} \quad (2.2.8)$$

Проробивши зазначений процес ще $(n-1)$ раз, одержимо загальний розв'язок рівняння в параметричному вигляді

$$\begin{cases} x = \varphi(t), \\ y = \psi_n(t, C_1, \dots, C_n). \end{cases} \quad (2.2.9)$$

3. Рівняння вигляду

$$F(y^{(n-1)}, y^{(n)}) = 0. \quad (2.2.10)$$

Нехай це рівняння вдалося записати в параметричному вигляді

$$\begin{cases} y^{(n-1)} = \varphi(t), \\ y^{(n)} = \psi(t). \end{cases} \quad (2.2.11)$$

Використовуючи основне співвідношення $dy^{(n-1)} = y^{(n)} \cdot dx$, одержуємо

$$dx = \frac{dy^{(n-1)}}{y^{(n)}} = \frac{\varphi'(t)}{\psi(t)} \cdot dt. \quad (2.2.12)$$

Проінтегрувавши, маємо

$$x = \int \frac{\varphi'(t)}{\psi(t)} \cdot dt + C_1 = \psi_1(t, C_1). \quad (2.2.13)$$

І одержали параметричний запис майже (2.2.8).

Використовуючи попередній пункт, запишемо загальний розв'язок у параметричному вигляді:

$$\begin{cases} x = \psi(t, C_1), \\ y = \varphi_n(t, C_2, \dots, C_n). \end{cases} \quad (2.2.14)$$

4. Нехай рівняння вигляду

$$F(y^{(n-2)}, y^{(n)}) = 0 \quad (2.2.15)$$

можна розв'язати відносно старшої похідної

$$y^{(n)} = f(y^{(n-2)}). \quad (2.2.16)$$

Домножимо його на $2y^{(n-1)} \cdot dx$ й одержимо

$$2y^{(n-1)} \cdot y^{(n)} \cdot dx = 2f(y^{(n-2)}) \cdot y^{(n-1)} \cdot dx. \quad (2.2.17)$$

Перепишемо його у вигляді

$$d(y^{(n-1)})^2 = 2f(y^{(n-2)}) \cdot dy^{(n-2)}. \quad (2.2.18)$$

Проінтегрувавши, маємо

$$(y^{(n-1)})^2 = 2 \int f(y^{(n-2)}) \cdot dy^{(n-2)} + C_1, \quad (2.2.19)$$

тобто

$$y^{(n-1)} = \pm \sqrt{2 \int f(y^{(n-2)}) \cdot dy^{(n-2)} + C_1}, \quad (2.2.20)$$

або

$$y^{(n-1)} = \pm \psi_1(y^{(n-2)}, C_1). \quad (2.2.21)$$

Таким чином одержали параметричний запис майже (2.2.11) і повернулися до третього випадку.