

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Вища математика»
для студентів спеціальностей 131–прикладна механіка,
133 – галузеве машинобудування
(бакалаврський рівень вищої освіти)**

Частина 2

Дніпро НМетАУ 2017

УДК 517(07)

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Вища математика» для студентів спеціальностей 131 – прикладна механіка, 133 – галузеве машинобудування (бакалаврський рівень вищої освіти). У 2-х частинах. Частина 2 / Укл.: В.Л. Копорулін, Л.В. Моссаковська, І.П. Заєць, І.Л. Шинковська, О.В. Білова, П.Г. Хорошманенко. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 79 с.

Наведені робочі програми до вивчення дисципліни «Вища математика» у II семестрі, списки рекомендованої літератури, методичні вказівки, супроводжені розв’язанням типових прикладів з докладними поясненнями, та варіанти контрольних завдань.

Призначені для студентів першого курсу спеціальностей 131 – прикладна механіка, 133 – галузеве машинобудування заочної форми навчання (бакалаврський рівень вищої освіти).

Укладачі: В.Л. Копорулін, канд. техн. наук, доц.
Л.В. Моссаковська, ст. викл.
І.П. Заєць, асистент
І.Л. Шинковська, ст. викладач
О.В. Білова, канд. техн. наук, доц.
П.Г. Хорошманенко, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск В.Л. Копорулін, канд. техн. наук, доц.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОБОЧА ПРОГРАМА (II семестр)	4
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	7
КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 2	8
Методичні вказівки до виконання	9
Індивідуальні завдання	57
ВИМОГИ до оформлення контрольної роботи, її подання і перевірка	70
ДОДАТКИ	73

ВСТУП

Вища математика без перебільшення є однією з найважливіших складових практично усіх природознавчих і технічних дисциплін. Тому її вивчення вкрай важливе для фундаментальної фахової підготовки сучасного інженера.

Лекції і практичні заняття, які проводяться для студентів заочної форми навчання, носять переважно оглядовий характер. Їх мета – створити уяву щодо загальної схеми побудови даного розділу математики, ознайомити з основними теоретичними відомостями і методами розв’язання типових задач. Головною ж формою навчання студента-заочника є самостійна робота. Вивчення теоретичних положень доцільно супроводжувати самостійним розв’язанням відповідних задач і лише після вироблення достатніх практичних навичок приступати до виконання завдань контрольної роботи. Необхідні консультації протягом навчального семестру надаються викладачами академії згідно із затвердженим розкладом.

Сьогодні в Інтернеті неважко знайти величезну кількість літератури з будь-якої теми, в тому числі і з вищої математики. Тому до списку рекомендованої літератури увійшли лише деякі з найбільш уживаних на думку авторів джерел. Рекомендації щодо їх використання дані у методичних вказівках до виконання кожної контрольної роботи. Консультації відносно інших підручників студент може отримати у викладача.

РОБОЧА ПРОГРАМА

навчальної дисципліни «ВИЩА МАТЕМАТИКА»

II семестр

Розподіл навчальних годин

Кількість годин				Самостійної роботи	Кількість контр. робіт	Форма звітності
УСЬОГО	Аудиторних занять		Практичних занять			
	Усього	Лекцій				
255	44	22	22	211	1	екзамен

Зміст програми

11. Подвійний і криволінійні інтеграли та їх застосування

37. Означення подвійного інтеграла у декартових координатах, умови його існування, геометричний зміст і основні властивості. Обчислення подвійного інтеграла у декартових та полярних координатах.

38. Обчислення площі плоскої фігури, об'єму тіла та площі поверхні.

39. Застосування подвійного інтеграла при розв'язуванні деяких задач механіки: обчислення статичних моментів, координат центру мас та моментів інерції плоскої платівки.

40. Поняття криволінійного інтеграла першого роду, його геометричний зміст і обчислення для різних способів завдання кривої.

41. Поняття криволінійного інтеграла другого роду, його фізичний зміст, обчислення, зв'язок із подвійним інтегралом (формула Гріна), незалежність від шляху інтегрування.

12. Диференціальні рівняння першого порядку

42. Задачі, які приводять до диференціальних рівнянь. Поняття звичайного диференціального рівняння першого порядку, загальний та частинний

розв'язки, їх геометричний зміст. Задача Коші та її геометричний зміст. Теорема Коші (про існування і єдиність розв'язку задачі Коші). Диференціальні рівняння з відокремленими та відокремлюваними змінними.

43. Однорідні диференціальні рівняння першого порядку та такі, що до них приводяться. Лінійні диференціальні рівняння першого порядку, їх розв'язування методами Лагранжа (варіації довільної сталої) і Бернуллі. Рівняння Бернуллі.

44. Постановка і розв'язування задач геометричного і фізичного змісту, які приводять до звичайних диференціальних рівнянь першого порядку.

13. Диференціальні рівняння вищих порядків

45. Поняття звичайного диференціального рівняння вищого порядку. Розв'язок рівняння. Задача Коші.

46. Деякі типи диференціальних рівнянь вищих порядків, що допускають пониження порядку.

47. Поняття лінійного диференціального рівняння n -го порядку. Загальні властивості.

48. Умови лінійної залежності і незалежності системи функцій. Визначник Вронського та його властивості. Фундаментальна система розв'язків лінійного однорідного рівняння, необхідна і достатня умова її утворення. Теорема про структуру загального розв'язку. Побудова рівняння за фундаментальною системою. Розв'язування лінійних однорідних диференціальних рівнянь вищих порядків зі сталими коефіцієнтами.

49. Лінійні неоднорідні диференціальні рівняння вищих порядків: теорема про структуру загального розв'язку, принцип суперпозиції частинних розв'язків. Розв'язування рівнянь зі сталими коефіцієнтами: метод варіації довільних сталих (метод Лагранжа), підбір частинного розв'язку та його відшукування методом невизначених коефіцієнтів у випадку "спеціальної" правої частини.

50. Канонічні і нормальні системи звичайних диференціальних рівнянь. Розв'язок системи. Задача Коші. Розв'язування нормальних систем лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами методом послідовного виключення невідомих.

14. Числові ряди

51. Поняття числового ряду. Збіжність і розбіжність ряду. Ряд геометричної прогресії, ряд Діріхле. Необхідна умова збіжності. Достатня умова розбіжності. Залишок числового ряду. Основні властивості збіжних рядів.

52. Поняття факторіала. Достатні умови (ознаки) збіжності числових рядів з додатними членами: ознака порівняння у звичайному та граничному вигляді, ознака Д'Аламбера, "радикальна" ознака Коші, "інтегральна" ознака Маклорена-Коші.

53. Абсолютна і умовна збіжності знакозмінних числових рядів. Збіжність знакопозначених рядів (ознака Лейбніца). Властивості знакопозначених числових рядів.

15. Степеневі ряди та їх застосування

54. Поняття функціонального ряду. Область збіжності і залишок функціонального ряду, абсолютна і умовна збіжності.

55. Поняття рівномірної збіжності функціонального ряду. Властивості рівномірно збіжних рядів. Ознака Вейєрштрасса.

56. Степеневий ряд як частинний випадок функціонального ряду. Збіжність степеневих рядів (теорема Абеля). Радіус та інтервал збіжності степеневого ряду, їх обчислення. Область збіжності степеневого ряду. Основні властивості степеневих рядів.

57. Ряди Тейлора і Маклорена. Умови розвинення функції в ряд Тейлора. Формула Тейлора із залишковим членом у формі Лагранжа. Розвинення функцій в ряди Тейлора і Маклорена. Таблиця найпростіших розвинень та її застосування.

58. Наближені обчислення значень функцій, визначених інтегралів та відшукування частинних розв'язків деяких диференціальних рівнянь за допомогою степеневих рядів.

16. Ряди Фур'є

59. Періодичні процеси. Гармонічні коливання. Тригонометричний ряд та його властивості. Гармонічний аналіз.

60. Тригонометричний ряд Фур'є. Теорема збіжності ряду Фур'є. Умови Діріхле.

61. Розвинення в ряд Фур'є періодичних функцій на основному і довільному проміжках. Ефект Гіббса. Особливості рядів Фур'є парних і непарних функцій.

62. Розвинення в ряд Фур'є неперіодичних функцій.

17. Елементи операційного числення

63. Перетворення Лапласа: основні поняття і означення. Властивості перетворення Лапласа та їх застосування. Таблиця зображень деяких основних функцій.

64. Способи відновлення оригінала за зображенням. Розв'язання задач Коші для лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами і систем таких рівнянь операційним методом.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ПІДРУЧНИКИ І НАВЧАЛЬНІ ПОСІБНИКИ

1. Волков И.К., Канатников А.Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 228 с.
2. Данко П.Е., Попов А.Г., Кожевникова Т.Я. Высшая математика в упражнениях и задачах. В 2-х ч. Ч. 2: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. – 416 с.
3. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика: Навч. посібник. – К.: А.С.К., 2006. – 648 с.
4. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. Операционное исчисление. Теория устойчивости: Задачи и примеры с подробными решениями: Учеб. пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 176 с.
5. Овчинников П.П., Яремчук Ф.П., Михайленко В.М. Вища математика: Підручник. У 2-х ч. Ч.2.: Диференціальні рівняння. Операційне числення. Ряди та їх застосування. – К.: Техніка, 2000. – 792с.

6. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. – М.: Айрис-пресс, 2009. – 608 с.
7. Решебник. Высшая математика. Специальные разделы / В.И. Афанасьев и др.; под ред. А.И. Кириллова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 400 с.
8. Тевяшев А.Д., Литвин О.Г., Кривошеєва Г.М. та ін. Вища математика у прикладах та задачах. Ч.3. Диференціальні рівняння. Ряди. Функції комплексної змінної. Операційне числення. – Харків: ХНУРЕ, 2002. – 596с.
9. Шипачев В.С. Высшая математика: Учебник для вузов. – М.: Юрайт, Высшее образование, 2009. – 480 с.
10. Эйдерман В.Я. Основы теории функций комплексного переменного и операционного исчисления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 256 с.

ЗБІРНИКИ ЗАДАЧ

11. Вища математика: Збірник задач: Навч. посібник / В.П. Дубовик, І.І. Юрик, І.П.Вовкодав та ін.; За ред. В.П.Дубовика, І.І.Юрика. – К.: А.С.К., 2004. – 480 с.
12. Сборник задач по высшей математике. 2 курс / К.Н. Лунгу и др.; под ред. С.Н. Федина. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 592 с.
13. Сборник задач по математике для втузов. В 4 частях. Ч. 2: Учеб. пособие для втузов / Под общ. ред. А.В. Ефимова и А.С. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 432 с.
14. Сборник задач по математике для втузов. В 4 частях. Ч. 3: Учеб. пособие для втузов / Под общ. ред. А.В. Ефимова и А.С. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 576 с.

КОНТРОЛЬНА РОБОТА № 2

Виконання контрольної роботи треба починати з вивчення теоретичних положень за наведеними посиланнями, причому це необхідно поєднувати з самостійним розв'язанням рекомендованих задач. До виконання контрольних завдань доцільно приступати тільки після вироблення достатніх практичних навичок. Типові приклади наведені з метою допомогти в цьому.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ

Рекомендується (скориставшись одним або двома з наведених нижче джерел)

- вивчити теоретичні положення за [3], гл. 8, §§1.1-1.5, 2, 3, 4.1, 4.2, 6, гл. 10, §§ 1, 3.1-3.8; [6], гл. X, §§ 47, 48.1 - 48.4, 49, 50, 51.1-51.4, 52, гл. XI, § 53, гл. XII, §§ 55, 56; [8], гл.1, §§ 1,2, гл.2 §§1-3; [9], гл. 13, §§ 1-7, гл. 15, §§ 1.1-1.6, 2 - 4; [3], гл. 9, §§ 1.1-1.5, 2.1-2.6, 3.1-3.5; [6], гл. XIII, XIV, XV, §§ 66.1 - 67.4; [9], гл. 14, §§ 1-5, 7; [6], гл. XVIII; [8], гл. 4, §§1,2; [10], гл. VIII; [1], гл. 6; [12], гл. 1-2.
- розібрати розв’язання задач у [3], гл. I, §§ 1-6, гл. II, §§ 1-3, гл. IV; [2], гл. III, §§ 1, 3-6, 8; [2], гл. VIII, §§ 1-4; [4], гл. 2; [7], гл. IX, § 33, №№ 33.36-33.41; [8], гл. 4§1, пр. 1-6, §2, пр. 1-3; [10], гл. 1, § 1, пр. 1-24, § 2, пр. 1-3, § 4;
- самостійно розв’язати задачі: [2], №№ 10-12, 17, 19, 22, 23, 31, 34, 41, 42, 186, 188, 191, 197, 214, 217, 222, 515, 516, 523, 550, 551, 554, 568, 570, 603, 605, 611, 645, 647, 651, 652, 659, 660, 685, 686, 696, 697, 698, 703, 704, 721, 723, 725, 743, 744, 764, 766, 778, 779, 781, 797; [5], №№ 188, 202, 216, 218, 219; [11], гл. 8, №№ 2, 4, 43, 44, 48, 61, 66, 84, 86, 103, 105, 115, 121, 124, 133, 140, 206, 213, 214, 215, 217, 221, 227, 246-а, 246-б, 270 – 273, 291, 308 – 310, 315, 322, 339, 345, 350, 373, 376, 378, 395, 396, 405, 406, гл. 10, №№ 1, 3, 7, 9, 18, 24, 46, 48, 50, 51, 69, 71, 74, 76, 111, 116, 124, 130, 406 – 414, 429, 471 – 473, 477, 478, 491, 492, 537, 539; [12], №№ 2.1.2 (а, б), 16, 19, 23, 25, 40, 64, 2.2.2, 4, 10, 27, 2.3.2, 3, 5, 12, 23, 2.6.2, 4, 7, 9, 12, 13, 17, 24, 27, 28, 30, 2.7.4, 6, 19, 26, 34, 38_– 40, 44, 45, 49, 58, 61, 78, 79, 81, 86, 87, 2.8.4, 5, 7, 8, 3.1.9, 10, 11, 16, 17, 21, 24, 27 - 29, 64, 3.2.8, 9, 13, 3.3.4, 5, 4.1.6, 9, 14, 25, 34, 4.2.3, 7, 16, 17, 42; [13], 9.2, 9.3, 9.4, 9.7, 9.10, 9.11, 9.18, 9.19, 9.20, 9.24, 9.26, 9.28, 9.31, 9.41, 9.43, 9.45, 9.49, 9.59, 10.22-10.25, 10.36, 10.46, 10.47, 10.50, 10.51, 10.67, 10.68, 10.69, 10.71, 10.86, 10.89, 10.211, 10.212, 10.215-10.217, 10.219, 10.321, 10.322, 10.323, 10.342, 10.343, 10.354, 10.357, 10.362, 10.370, 10.431, 10.432, 10.441, 10.442; [14], 11.48, 11.49, 11.51, 11.79, 11.82. [2], №№ 301, 302, 304, 305, 307, 308, 310, 311, 314, 368, 374, 377, 391, 392, 394, 416, 419, 423, 435, 489, 492, 497, 500; [11], гл. 9, №№ 2, 4, 41, 43, 50, 52, 54, 56, 59, 64, 66, 68, 71, 75, 77, 80, 131, 136, 140, 143, 154, 211, 214, 216, 229, 233, 250, 293, 294, 302, 303, 307, 314, 316, 332, 338, 343, 348, 351, 353, 357, 359, 382, 384, 391, 403; [12], №№ 1.1.12, 13, 20, 21, 24, 25, 29, 30, 37, 39, 40, 42, 44, 46-49, 51, 53, 1.2.7, 8, 12, 14, 16, 18, 1.3.7, 8, 10, 20, 34, 35, 1.4.10, 12, 18, 21-б, 23-б, 25,

29; [14], 12.21, 12.22, 12.24, 12.29, 12.31, 12.35, 12.43, 12.45, 1.52, 12.91, 12.93, 12.95, 12.96, 12.165-12.167, 12.215, 12.218, 12.236, 12.265, 12.274, 12.289, 12.292, 12.327, 12.328, 12.488, 12.498; [2], 1112, 1118, 1125, 1126, 1143, 1146, 1148, 1149; [8], №№ 4.3-4.5. 4.12-4.14. 4.16, 4.19, 4.32, 4.33, 4.51, 4.53; [12], 8.1.2, 3, 6, 8, 10, 13, 23-31, 43, 54, 61, 62, 64, 67, 8.2.2-7, 10, 12-а,б, 13, 14, 8.3.4, 5, 9, 17, 38, 48, 49; [14], гл. 14, №№ 1-9, 17, 18, 19, 25, 32, 34, 40, 44, 45, 47, 48, 74 -76, 79, 86,87, 93, 94, 111, 113, 114, 131.

Приклад 1. Обчислити повторний інтеграл.

$$\text{а) } \int_0^2 dx \int_x^{x\sqrt{3}} \frac{xdy}{x^2 + y^2}; \quad \text{б) } \int_1^3 dy \int_2^5 \frac{dx}{(x+2y)^2}.$$

Розв'язання.

$$\begin{aligned} \text{а) } \int_0^2 dx \int_x^{x\sqrt{3}} \frac{xdy}{x^2 + y^2} &= \int_0^2 \left(x \cdot \frac{1}{x} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \Big|_x^{x\sqrt{3}} \right) dx = \int_0^2 (\operatorname{arctg} \sqrt{3} - \operatorname{arctg} 1) dx = \\ &= \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{4} \right) \cdot x \Big|_0^2 = \frac{\pi}{12} \cdot 2 = \frac{\pi}{6}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } \int_1^3 dy \int_2^5 \frac{dx}{(x+2y)^2} &= - \int_1^3 \left(\frac{1}{x+2y} \Big|_2^5 \right) dy = - \int_1^3 \left(\frac{1}{5+2y} - \frac{1}{2+2y} \right) dy = \\ &= - \left(\frac{1}{2} \ln|5+2y| - \frac{1}{2} \ln|2+2y| \right) \Big|_1^3 = - \frac{1}{2} (\ln 11 - \ln 8 - \ln 7 + \ln 4) = - \frac{1}{2} \ln \frac{44}{56} = \frac{1}{2} \ln \frac{14}{11}. \end{aligned}$$

Приклад 2. Змінити порядок інтегрування у повторному інтегралі.

$$\text{а) } \int_0^4 dx \int_{\sqrt{4x-x^2}}^{\sqrt{16-x^2}} f(x, y) dy; \quad \text{б) } \int_{-\sqrt{2}}^{\sqrt{2}} dy \int_{y^2-1}^{y^2/2} f(x, y) dx.$$

Розв'язання.

а) Судячи з заданого повторного інтеграла, область інтегрування спроектована на вісь Ox у відрізок $[1, 4]$ і обмежена знизу лінією $y = \sqrt{4x - x^2}$, а зверху – лінією $y = \sqrt{16 - x^2}$ (обидві ці лінії є частинами відповідних кіл). Область показана на рис. 1.

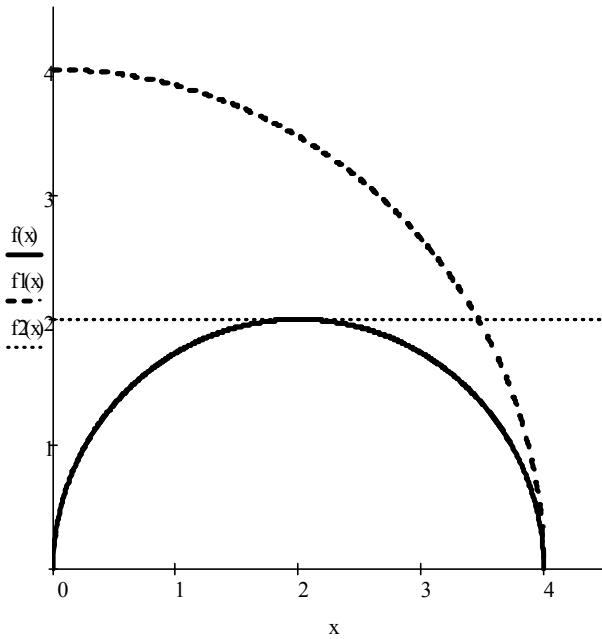


Рис. 1

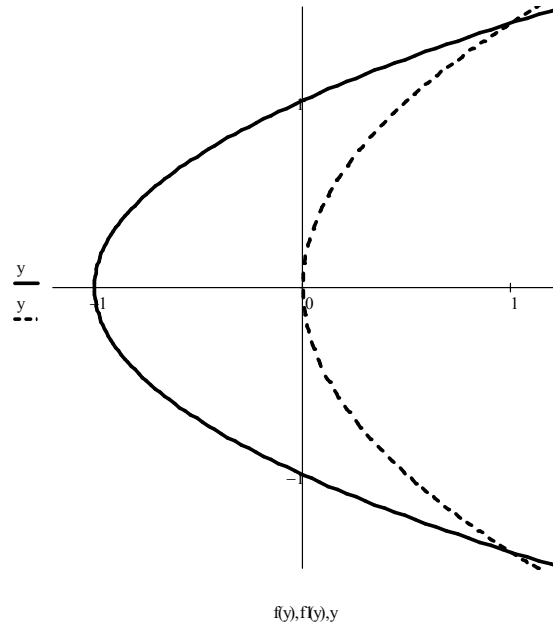


Рис. 2

Перепроєктуємо область на вісь Oy . Для цього розв'яжемо рівняння обмежувачих ліній відносно x , враховуючи, що $x \geq 0$:

$$y^2 = 4x - x^2 \Rightarrow x = 2 \pm \sqrt{4 - y^2}, \quad y^2 = 16 - x^2 \Rightarrow x = \sqrt{16 - y^2}.$$

Область інтегрування розіб'ється на три простих області. Перша з них проєктується у відрізок $[0, 2]$ осі Oy і обмежена зліва віссю Oy , а справа – лінією $x = 2 - \sqrt{4 - y^2}$. Друга область проєктується також у відрізок $[0, 2]$ осі Oy і обмежена зліва лінією $x = 2 + \sqrt{4 - y^2}$, а справа – лінією $x = \sqrt{16 - y^2}$. Третя область проєктується у відрізок $[2, 4]$ осі Oy і обмежена зліва віссю Oy , а справа – лінією $x = \sqrt{16 - y^2}$. Отже,

$$\int_0^4 dx \int_{\sqrt{4x-x^2}}^{\sqrt{16-x^2}} f(x, y) dy = \int_0^2 dy \int_0^{2-\sqrt{4-y^2}} f(x, y) dx + \int_0^2 dy \int_{2+\sqrt{4-y^2}}^{\sqrt{16-y^2}} f(x, y) dx + \int_2^4 dy \int_0^{\sqrt{16-y^2}} f(x, y) dx.$$

б) Судячи з заданого повторного інтеграла, область інтегрування спроектована на вісь Oy у відрізок $[-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$ і обмежена зліва лінією $x = y^2 - 1$, а справа – лінією $x = y^2 / 2$ (обидві ці лінії є параболоми). Область показана на рис. 2.

Перепроєктуємо область на вісь Ox . Для цього розв'яжемо рівняння обмежувачих ліній відносно y :

$$x = y^2 - 1 \Rightarrow y = \pm\sqrt{x+1}, \quad x = y^2/2 \Rightarrow y = \pm\sqrt{2x}.$$

Область інтегрування розіб'ється на три простих області. Перша з них проєктується у відрізок $[-1, 0]$ осі Ox і обмежена знизу гілкою $y = -\sqrt{x+1}$ параболу $x = y^2 - 1$, а зверху – гілкою $y = \sqrt{x+1}$ тієї ж самої параболу. Друга область проєктується у відрізок $[0, 1]$ осі Ox і обмежена знизу гілкою $y = -\sqrt{x+1}$ параболу $x = y^2 - 1$, а зверху – гілкою $y = -\sqrt{2x}$ параболу $x = y^2/2$. Третя область проєктується у той самий відрізок $[0, 1]$ осі Ox і обмежена знизу гілкою $y = \sqrt{2x}$ параболу $x = y^2/2$, а зверху – гілкою $y = \sqrt{x+1}$ параболу $x = y^2 - 1$. Отже,

$$\int_{-\sqrt{2}}^{\sqrt{2}} dy \int_{y^2-1}^{y^2/2} f(x, y) dx = \int_{-1}^0 dx \int_{-\sqrt{x+1}}^{\sqrt{x+1}} f(x, y) dy + \int_0^1 dx \int_{-\sqrt{x+1}}^{-\sqrt{2x}} f(x, y) dy + \int_0^1 dx \int_{\sqrt{2x}}^{\sqrt{x+1}} f(x, y) dy.$$

Приклад 3. Обчислити подвійний інтеграл $\iint_D (3x^2 - 2xy + y) dx dy$, де

область D обмежена лініями $x = 0$, $x = y^2$, $y = 2$.

Розв'язання. Область D зображена на рис. 3 (обмежена гілкою параболу $x = y^2$, віссю Oy та прямою $y = 2$). Спроєктуємо її на вісь Oy .

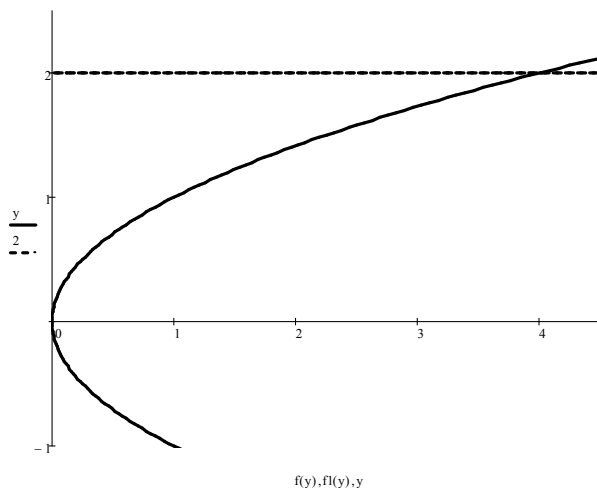


Рис. 3

$$\begin{aligned} \text{Тоді } \iint_D (3x^2 - 2xy + y) \, dx dy &= \int_0^2 dy \int_0^{y^2} (3x^2 - 2xy + y) \, dx = \int_0^2 (x^3 - x^2 y + xy) \Big|_0^{y^2} dy = \\ &= \int_0^2 (y^6 - y^5 + y^3) \, dy = \left(\frac{y^7}{7} - \frac{y^6}{6} + \frac{y^4}{4} \right) \Big|_0^2 = \frac{244}{21} \approx 11.62. \end{aligned}$$

Зауваження. При проектуванні області на вісь Ox обираємо додатну вітку $y = \sqrt{x}$ параболи, область проектується у відрізок $[0, 4]$, отже,

$$\begin{aligned} \iint_D (3x^2 - 2xy + y) \, dx dy &= \int_0^4 dx \int_{\sqrt{x}}^2 (3x^2 - 2xy + y) \, dy = \int_0^4 \left(3x^2 y - xy^2 + \frac{y^2}{2} \right) \Big|_{\sqrt{x}}^2 dx = \\ &= \int_0^4 \left(6x^2 - 4x + 2 - 3x^2 \sqrt{x} + x^2 - \frac{x}{2} \right) dx = \left(\frac{7x^3}{3} - \frac{9x^2}{4} + 2x - \frac{6x^3 \sqrt{x}}{7} \right) \Big|_0^4 = \frac{244}{21}. \end{aligned}$$

Приклад 4. Обчислити площу фігури, обмеженої лініями $y^2 = x + 1$, $x = y^2 - y^3$, $y = -1$.

Розв'язання. Фігура зображена на рис. 4 (обмежена параболою $y^2 = x + 1$, лінією $x = y^2 - y^3$ та прямою $y = -1$). Спроектуємо її на вісь Oy .

$$\text{Тоді } S = \iint_D dx dy = \int_{-1}^1 dy \int_{y^2-1}^{y^2-y^3} dx = \int_{-1}^1 (y^2 - y^3 - y^2 + 1) dy = \left(y - \frac{y^4}{4} \right) \Big|_{-1}^1 = 2 \text{ (од}^2\text{)}.$$

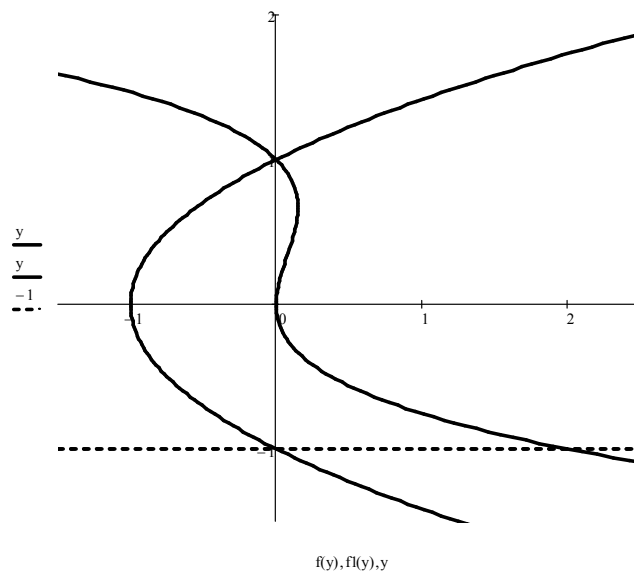


Рис. 4

Приклад 5. Обчислити криволінійні інтеграли.

а) $\int_L \frac{y dl}{\sqrt{x}}$, якщо L – дуга півкубічної параболи $y^2 = \frac{4}{9}x^3$ між точками $A(3; 2\sqrt{3})$

й $B\left(8; \frac{32\sqrt{2}}{3}\right)$;

б) $\int_L \sqrt{x^2 + y^2} dl$, де L – дуга кривої $x = \cos t + t \sin t$, $y = \sin t - t \cos t$

$(0 \leq t \leq 2\pi)$;

в) $\int_L (x + y) dl$, де L – права пелюстка лемніскати $\rho^2 = 4 \cos 2\varphi$;

г) $\int_{OA} 2xy dx - x^2 dy$, де OA – дуга параболи $x = 2y^2$ від точки $O(0; 0)$ до точки

$A(2; 1)$;

д) $\int_L (6 - y) dx + x dy$, де L – перша арка циклоїди $x = 3(t - \sin t)$,

$y = 3(1 - \cos t)$ ($0 \leq t \leq 2\pi$).

Розв'язання.

а) Маємо криволінійний інтеграл першого роду (по довжині дуги). Будемо вважати, що крива L задана рівнянням вигляду $y = y(x)$ у декартових координатах. Тоді $y = \frac{2}{3}\sqrt{x^3}$ (обираємо знак «+», оскільки точки A й B

належать першій чверті), $y' = \sqrt{x}$, отже, $dl = \sqrt{1 + y'^2} dx = \sqrt{1 + x} dx$.

Переходячи до звичайного інтеграла, будемо мати

$$\int_L \frac{y dl}{\sqrt{x}} = \int_3^8 \frac{\frac{2}{3}\sqrt{x^3}}{\sqrt{x}} \sqrt{1+x} dx = \frac{2}{3} \int_3^8 x \sqrt{1+x} dx = \left| \begin{array}{l} 1+x = t^2, \quad dx = 2t dt, \\ x = t^2 - 1, \quad x \quad 3 \quad 8 \\ \quad \quad \quad t \quad 2 \quad 3 \end{array} \right| =$$

$$= \frac{2}{3} \int_2^3 (t^2 - 1) \cdot t \cdot 2t dt = \frac{4}{3} \left(\frac{t^5}{5} - \frac{t^3}{3} \right) \Big|_2^3 = \frac{4}{3} \left(\frac{243}{5} - 9 - \frac{32}{5} + \frac{8}{3} \right) = \frac{2152}{45} \approx 47.82;$$

б) Маємо криволінійний інтеграл першого роду. Перш за все обчислимо

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\cos^2 t + 2t \cos t \sin t + t^2 \sin^2 t + \sin^2 t - 2t \cos t \sin t + t^2 \cos^2 t} = \sqrt{1 + t^2}.$$

Оскільки крива L задана параметричними рівняннями, то

$$\dot{x}(t) = -\sin t + \sin t + t \cos t = t \cos t, \quad \dot{y}(t) = \cos t - \cos t + t \sin t = t \sin t,$$

$$dl = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} dt = \sqrt{t^2 \cos^2 t + t^2 \sin^2 t} = |t| = t \quad (t \geq 0).$$

Перейдемо до звичайного

інтеграла:
$$\int_L \sqrt{x^2 + y^2} dl = \int_0^{2\pi} t \sqrt{1+t^2} dt = \frac{1}{3} (1+t^2)^{3/2} \Big|_0^{2\pi} = \frac{1}{3} [(1+4\pi^2)^{3/2} - 1].$$

в) Маємо криволінійний інтеграл першого роду. У звичайній полярній системі

координат $\rho = 2\sqrt{\cos 2\varphi}$, отже, $\cos 2\varphi \geq 0$, $-\frac{\pi}{4} + k\pi \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4} + k\pi$ ($k \in \mathbb{Z}$). Права

пелюстка лемніскати розташована в секторі $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$ ($k = 0$) (рис. 5).

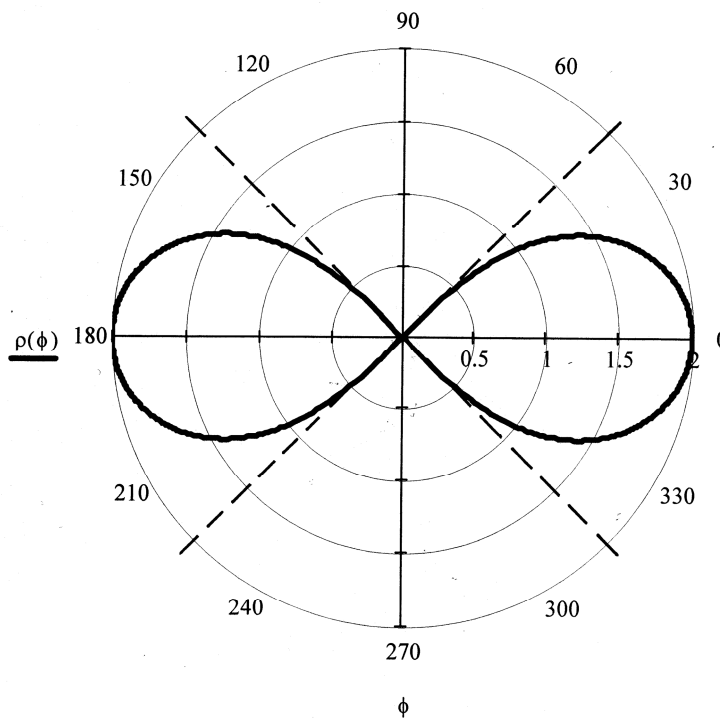


Рис. 5

Крива L задана рівнянням у полярних координатах, отже, $x = \rho \cos \varphi$,

$y = \rho \sin \varphi$, де $\rho = 2\sqrt{\cos 2\varphi}$. Оскільки $\rho' = -\frac{2 \sin 2\varphi}{\sqrt{\cos 2\varphi}}$, то диференціал довжини

дуги
$$dl = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2} d\varphi = \sqrt{4 \cos 2\varphi + 4 \frac{\sin^2 2\varphi}{\cos 2\varphi}} d\varphi = \frac{2}{\sqrt{\cos 2\varphi}} d\varphi.$$
 Перейдемо до

звичайного інтеграла:

$$\int_L (x+y) dl = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} 2\sqrt{\cos 2\varphi} \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi) \cdot \frac{2}{\sqrt{\cos 2\varphi}} d\varphi = 4(\sin \varphi - \cos \varphi) \Big|_{-\pi/4}^{\pi/4} = 4\sqrt{2}.$$

г) Маємо криволінійний інтеграл другого роду (по координатах). Крива L задана рівнянням у декартових координатах, отже, $dx = x'dy = 4ydy$. Перейдемо до звичайного інтеграла:

$$\int_{OA} 2xydx - x^2 dy = \int_0^1 (2 \cdot 2y^2 y \cdot 4y - 4y^4) dy = 12 \cdot \frac{y^5}{5} \Big|_0^1 = \frac{12}{5}.$$

д) Маємо криволінійний інтеграл другого роду. Крива L задана параметричними рівняннями, отже, $dx = \dot{x}(t)dt = 3(1 - \cos t)dt$, $dy = \dot{y}(t)dt = 3 \sin t dt$. Перейдемо до звичайного інтеграла:

$$\begin{aligned} \int_L (6-y) dx + xdy &= \int_0^{2\pi} \{ [6 - 3(1 - \cos t)] \cdot 3(1 - \cos t) + 3(t - \sin t) \cdot 3 \sin t \} dt = \\ &= 9 \int_0^{2\pi} (1 - \cos^2 t + t \sin t - \sin^2 t) dt = 9 \int_0^{2\pi} t \sin t dt = \left| \begin{array}{l} u = t, \quad dv = \sin t dt, \\ du = dt, \quad v = -\cos t \end{array} \right| = \\ &= 9 (-t \cos t + \sin t) \Big|_0^{2\pi} = -18\pi. \end{aligned}$$

Приклад 6. З'ясувати, чи буде функція $y = x \arcsin x$ розв'язком рівняння $xy' - y = xtg \frac{y}{x}$.

Розв'язання. Якщо функція є розв'язком рівняння, то її підстановка до цього рівняння повинна перетворити його на вірну тотожність. Перевіримо це.

Підставимо $y' = \arcsin x + \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$ разом із $y = x \arcsin x$ до рівняння:

$$x \arcsin x + \frac{x^2}{\sqrt{1-x^2}} - x \arcsin x = xtg \frac{x \arcsin x}{x}.$$

З урахуванням того, що $tgx = \frac{\sin x}{\sqrt{1-\sin^2 x}}$ й $\sin(\arcsin x) = x$, отримуємо вірну

тотожність $\frac{x^2}{\sqrt{1-x^2}} = x \cdot \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$. Отже, задана функція справді задовольняє рівнянню, тобто є його розв'язком.

Приклад 7. Скласти рівняння кривої, якщо відомо, що вона проходить через точку $M_0(0, 1)$, а кутовий коефіцієнт дотичної до цієї кривої в кожній точці дорівнює $k(x, y) = x \sqrt[3]{y}$.

Розв'язання. Як відомо, кутовий коефіцієнт дотичної до кривої $y = y(x)$ в довільній точці $M(x, y)$ є $k(x, y) = y'$. Отже, маємо рівняння $y' = x \sqrt[3]{y}$.

Поділимо змінні і отримаємо $\frac{dy}{\sqrt[3]{y}} = x dx$, звідки $\frac{3}{2} \sqrt[3]{y^2} = \frac{x^2}{2} + \frac{C}{2}$ або

$y^2 = \left(\frac{x^2 + C}{3}\right)^3$. Отриманий загальний розв'язок є рівнянням сім'ї кривих.

Шукана крива проходить через точку M_0 , отже, її рівняння визначається значенням $C = C^*$, знайденим з умови $y(x_0) = y_0$, тобто, в даному випадку, з

умови $y(0) = 1$. Отже, $1^2 = \left(\frac{0 + C^*}{3}\right)^3$, звідки $C^* = 3$. Таким чином, рівняння

шуканої кривої є $y^2 = \left(\frac{x^2}{3} + 1\right)^3$. Графік додатної гілки кривої наведений на

рис. 6.

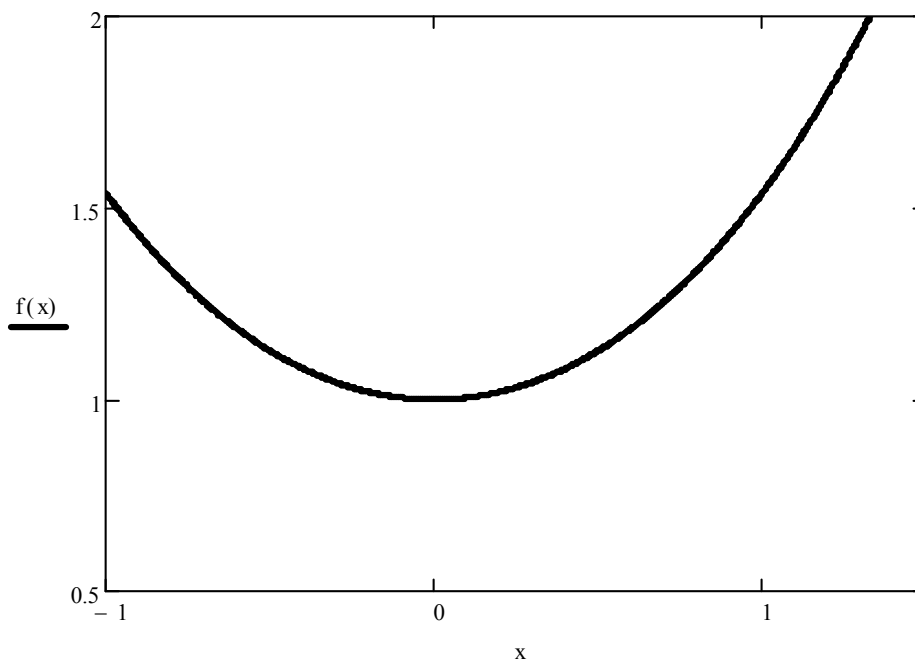


Рис. 6

Приклад 8. Розв'язати рівняння

а) $2xy^2 dx - y dy = yx^2 dy - 6x dx$; б) $\left(x - y \cos \frac{y}{x}\right) dx + x \cos \frac{y}{x} dy = 0$;

в) $y' = \frac{2x + y - 4}{x - y + 1}$; г) $y' + y \cos x = e^{-\sin x}$ (застосувати метод Бернуллі).

Розв'язання.

а) Перетворимо рівняння до вигляду $2x(y^2 + 3)dx = y(x^2 + 1)dy$. Отже, маємо рівняння з відокремлюваними змінними $X_1(x)Y_1(y)dx + X_2(x)Y_2(y)dy = 0$.

Поділимо обидві частини рівняння на добуток $(y^2 + 3)(x^2 + 1)$. Оскільки обидва множники не дорівнюють нулю (а саме, додатні), то при цьому частинні (або особливі) розв'язки рівняння не загублюються. Таким чином, дістаємо

рівняння з відокремленими змінними $\frac{2x}{x^2 + 1} dx = \frac{y}{y^2 + 3} dy$. Після інтегрування

отримуємо загальний інтеграл заданого рівняння $\ln(x^2 + 1) = \frac{1}{2} \ln(y^2 + 3) + \ln|C|$,

$C \neq 0$, який після потенціювання і використання властивостей логарифмів набуває вигляду $\frac{x^2 + 1}{\sqrt{y^2 + 3}} = C$.

б) Маємо *однорідне* диференціальне рівняння першого порядку $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$, тому що функції $P(x, y) = x - y \cos \frac{y}{x}$ й

$Q(x, y) = x \cos \frac{y}{x}$ є однорідними одного й того самого виміру. Справді,

$$P(\lambda x, \lambda y) = \lambda x - \lambda y \cos \frac{\lambda y}{\lambda x} = \lambda \cdot P(x, y), \quad Q(\lambda x, \lambda y) = \lambda x \cos \frac{\lambda y}{\lambda x} = \lambda \cdot Q(x, y).$$

Оскільки $x \neq 0$, то рівняння приводиться до вигляду

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{1 - \frac{y}{x} \cos \frac{y}{x}}{\cos \frac{y}{x}}. \text{ Застосуємо підстановку } y = ux. \text{ Тоді } y' = u'x + u \text{ і}$$

$$u'x + u = \frac{u \cos u - 1}{\cos u}; \quad u'x = \frac{u \cos u - 1}{\cos u} - u; \quad u'x = - \frac{1}{\cos u}; \quad \frac{du}{dx} x = - \frac{1}{\cos u};$$

$\cos u du + \frac{dx}{x} = 0$. Інтегрування отриманого рівняння з відокремленими

змінними дає загальний інтеграл $\sin u + \ln|x| = C$, який після повернення до вихідної змінної y набуває остаточного вигляду $\sin \frac{y}{x} + \ln|x| = C$.

в) Дане рівняння відноситься до типу $y' = f\left(\frac{a_1x + b_1y + c_1}{a_2x + b_2y + c_2}\right)$. Такі рівняння у

випадку $\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \neq 0$ зводяться до однорідних за допомогою підстановки

$x = x_0 + u$, $y = y_0 + v$, де x_0 , y_0 є розв'язком системи рівнянь

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1 = 0, \\ a_2x + b_2y + c_2 = 0 \end{cases}. \text{ Розв'язком системи } \begin{cases} 2x + y - 4 = 0, \\ x - y + 1 = 0 \end{cases} \text{ є } x_0 = 1, y_0 = 2.$$

Зробимо підстановку $x = 1 + u$, $y = 2 + v$. Тоді $dx = du$, $dy = dv$, $y' = \frac{dv}{du}$.

Отримуємо однорідне рівняння $\frac{dv}{du} = \frac{2u + v}{u - v}$. Розв'яжемо це рівняння за

допомогою підстановки $v = zu$, $\frac{dv}{du} = u \frac{dz}{du} + z$. Маємо

$$u \frac{dz}{du} + z = \frac{2 + z}{1 - z}; \quad u \frac{dz}{du} = \frac{2 + z^2}{1 - z}; \quad \frac{1 - z}{2 + z^2} dz = \frac{du}{u}.$$

Після інтегрування дістаємо загальний інтеграл

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arctg} \frac{z}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2} \ln(2 + z^2) = \ln|u| + C.$$

Повертаючись до вихідних змінних за формулами $z = \frac{v}{u}$, $v = y - 2$, $u = x - 1$,

остаточно отримуємо $\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{y-2}{x-1} \right) - \frac{1}{2} \ln \left[2 + \left(\frac{y-2}{x-1} \right)^2 \right] = \ln|x-1| + C$.

г) Маємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку $y' + p(x)y = q(x)$.

Розв'язок рівняння будемо шукати у вигляді добутку двох невідомих функцій $y = uv$, отже, $y' = u'v + uv'$. Підставимо y та y' у рівняння і отримаємо

$u'v + uv' + uv \cos x = e^{-\sin x}$ або $u'v + u(v' + v \cos x) = e^{-\sin x}$ (*). Невідому

функцію $v = v(x)$ будемо шукати з умови $v' + v \cos x = 0$ (**), отже,

$\frac{dv}{dx} = -v \cos x$ або $\frac{dv}{v} = -\cos x dx$. Інтегруючи, знаходимо $\ln|v| = -\sin x$,

звідки $v = e^{-\sin x}$ (для зручності беремо частинний розв'язок, якому відповідає нульове значення довільної сталої). Підставимо знайдену функцію v в рівняння (*) і з урахуванням (**) отримаємо $u'e^{-\sin x} = e^{-\sin x}$. Оскільки $e^{-\sin x} \neq 0 \quad \forall x$, то $u' = 1$ або $u = x + C$. Таким чином, загальний розв'язок має вигляд $y = (x + C)e^{-\sin x}$.

Приклад 9. Розв'язати задачу Коші $xy' + y = y^2 \ln x$, $y(1) = -\frac{1}{2}$.

Розв'язання. Оскільки $x > 0$, то без втрати розв'язку перетворимо рівняння до вигляду $y' + \frac{y}{x} = y^2 \frac{\ln x}{x}$. Отримали рівняння Бернуллі $y' + p(x)y = y^r q(x)$,

де $r \neq 0$, $r \neq 1$. Розв'яжемо його однойменним методом: $y = uv$, $y' = u'v + uv'$,

$$u'v + uv' + \frac{uv}{x} = u^2 v^2 \frac{\ln x}{x}; \quad u'v + u \left(v' + \frac{v}{x} \right) = u^2 v^2 \frac{\ln x}{x} \quad (*); \quad v' + \frac{v}{x} = 0 \quad (**);$$

$$\frac{dv}{v} = -\frac{dx}{x}; \quad \ln|v| = -\ln|x|; \quad v = \frac{1}{x}; \quad u' \frac{1}{x} = u^2 \frac{1}{x^2} \frac{\ln x}{x}; \quad \frac{du}{u^2} = \frac{\ln x}{x^2} dx;$$

$$-\frac{1}{u} = -\frac{\ln x + 1}{x} - C; \quad u = \frac{x}{\ln x + 1 + Cx}.$$

Загальний розв'язок $y = uv$, таким чином, має вигляд $y = \frac{1}{\ln x + 1 + Cx}$. Розв'язок поставленої задачі Коші \tilde{y}

визначається значенням довільної сталої C^* , знайденим з початкової умови:

$$-\frac{1}{2} = \frac{1}{1 + C^*}, \quad C^* = -3.$$

Отже, шуканий розв'язок має вигляд

$$\tilde{y} = \frac{1}{\ln x + 1 - 3x}.$$

Приклад 10. Розв'язати задачу Коші

а) $y'' = \frac{1}{1+x^2}$, $y(0) = -3$, $y'(0) = 2$; б) $x(y'' + 1) + y' = 0$, $y(1) = \frac{1}{4}$, $y'(1) = 0$;

в) $y'' \operatorname{tgy} = 2y'^2$, $y(1) = \frac{\pi}{4}$, $y'(1) = -\frac{1}{2}$; г) $y'' = \sqrt{1-y'^2}$, $y(0) = 2$, $y'(0) = 1$;

д) $2y'' = y' + y'^3$, $y(0) = \frac{\pi}{2}$, $y'(0) = 1$; е) $3y'y'' = e^y$, $y(-5) = 0$, $y'(-5) = 1$.

Розв'язання.

а) Рівняння має вигляд $y'' = f(x)$, тобто містить тільки старшу похідну і незалежну змінну. Знайдемо його загальний розв'язок шляхом послідовного двократного інтегрування:

$$\begin{aligned} \frac{d(y')}{dx} &= \frac{1}{1+x^2} \Rightarrow d(y') = \frac{dx}{1+x^2} \Rightarrow \int d(y') = \int \frac{dx}{1+x^2} + C_1 \Rightarrow \\ \Rightarrow y' &= \arctg x + C_1 \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \arctg x + C_1 \Rightarrow dy = (\arctg x + C_1) dx \Rightarrow \\ \Rightarrow y &= \int (\arctg x + C_1) dx + C_2 \Rightarrow y = x \arctg x - \frac{1}{2} \ln(1+x^2) + C_1 x + C_2. \end{aligned}$$

Частинний розв'язок $\tilde{y} = y(x, C_1^*, C_2^*)$ знайдемо, визначивши з початкових умов значення $C_1 = C_1^*$ та $C_2 = C_2^*$ довільних сталих: $y(0) = -3 \Rightarrow -3 = C_2^*$, $y'(0) = 2 \Rightarrow 2 = C_1^*$. Отже, розв'язок поставленої задачі Коші має вигляд $\tilde{y} = x \arctg x - \frac{1}{2} \ln(1+x^2) + 2x - 3$.

б) Рівняння має вигляд $F(x, y', y'') = 0$, тобто містить в явному вигляді незалежну змінну, але не містить невідому функцію. Порядок такого рівняння знижується на одиницю за допомогою підстановки $y' = p(x)$. Тоді $y'' = p'$ і рівняння набуває вигляду $x(p' + 1) + p = 0$. Отримали рівняння першого порядку, яке може бути віднесено як до однорідного, так і до лінійного.

Вважаючи його однорідним, тобто, $p' + 1 = -\frac{p}{x}$ зробимо підстановку $p = ux$.

$$\text{Тоді } p' = u'x + u \Rightarrow u'x + u = -1 - u \Rightarrow u'x = -(1 + 2u) \Rightarrow \frac{du}{1 + 2u} = -\frac{dx}{x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \ln|1 + 2u| = -\ln|x| + \frac{1}{2} \ln|C_1| \Rightarrow \sqrt{1 + 2u} = \frac{\sqrt{C_1}}{x} \Rightarrow 1 + 2u = \frac{C_1}{x^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u = \frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{x^2} - 1 \right) \Rightarrow p = \frac{C_1}{2x} - \frac{x}{2} \Rightarrow y' = \frac{C_1}{2x} - \frac{x}{2}. \text{ Після відокремлення}$$

змінних і інтегрування отримуємо загальний розв'язок $y = \frac{C_1}{2} \ln|x| - \frac{x^2}{4} + C_2$.

Враховуючи, що довільні сталі незалежні одна від одної і перепозначивши $\frac{C_1}{2}$

на C_1 , остаточно будемо мати $y = C_1 \ln|x| - \frac{x^2}{4} + C_2$. Значення $C_1 = C_1^*$ та $C_2 = C_2^*$ довільних сталих знайдемо з початкових умов:

$$y(1) = \frac{1}{4} \Rightarrow \frac{1}{4} = -\frac{1}{4} + C_2^* \Rightarrow C_2^* = \frac{1}{2}, \quad y'(1) = 0 \Rightarrow 0 = -\frac{1}{2} + C_1^* \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_1^* = \frac{1}{2}. \text{ Отже, розв'язок задачі Коші має вигляд } \tilde{y} = \frac{1}{2} \ln|x| - \frac{x^2}{4} + \frac{1}{2}.$$

в) Рівняння має вигляд $F(y, y', y'') = 0$, тобто містить в явному вигляді невідому функцію, але не містить незалежну змінну. Порядок такого рівняння знижується на одиницю за допомогою підстановки $y' = q(y)$. Тоді $y'' = q \frac{dq}{dy}$ і

рівняння набуває вигляду $q \frac{dq}{dy} \operatorname{ctgy} = 2q^2$. Отримали рівняння першого порядку

з відокремленими змінними. Запишемо його у вигляді $q \left(\frac{dq}{dy} \operatorname{ctgy} - 2q \right) = 0$.

Прирівнюючи до нуля кожен з множників, будемо мати $q = 0 \Rightarrow y' = 0 \Rightarrow$

$$\Rightarrow y = C; \quad \frac{dq}{dy} \operatorname{ctgy} - 2q = 0 \Rightarrow \frac{dq}{q} = 2 \operatorname{ctgy} dy \Rightarrow \ln|q| = 2 \ln|\sin y| + \ln|C_1| \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q = C_1 \sin^2 y \Rightarrow y' = C_1 \sin^2 y \Rightarrow \frac{dy}{\sin^2 y} = C_1 dx. \quad \text{Отже, загальний}$$

інтеграл рівняння має вигляд $\operatorname{ctgy} = C_1 x + C_2$ (знак « - » врахований). Бачимо, що розв'язок $y = C$ не є особливим, оскільки утворюється з загального при $C_1 = 0$. Значення $C_1 = C_1^*$ та $C_2 = C_2^*$ довільних сталих знайдемо з початкових умов:

$$y(1) = \frac{\pi}{4} \Rightarrow \operatorname{ctg} \frac{\pi}{4} = C_1^* + C_2^*, \quad y'(1) = -\frac{1}{2} \Rightarrow -\frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{4}} \left(-\frac{1}{2} \right) = C_1^* \Rightarrow C_1^* = 1,$$

$C_2^* = 0$. Отже, розв'язок задачі Коші має вигляд $\operatorname{ctgy} = x$.

г) Рівняння має вигляд $F(y', y'') = 0$, тобто не містить в явному вигляді ні невідому функцію, ні незалежну змінну. Порядок такого рівняння може бути знижений на одиницю за допомогою будь-якої з підстановок $y' = p(x)$ або

$y' = q(y)$. Переважність однієї з них визначається конкретним рівнянням. В даному випадку застосуємо підстановку $y' = p(x)$: $y'' = p'$,

$$p' = \sqrt{1-p^2} \Rightarrow \frac{dp}{\sqrt{1-p^2}} = dx \Rightarrow \arcsin p = x + C_1 \Rightarrow p = \sin(x + C_1) \Rightarrow$$

$\Rightarrow y' = \sin(x + C_1) \Rightarrow y = C_2 - \cos(x + C_1)$. Значення $C_1 = C_1^*$ та $C_2 = C_2^*$ довільних сталих знайдемо з початкових умов:

$$y(0) = 2 \Rightarrow 2 = C_2^* - \cos C_1^*, y'(0) = 1 \Rightarrow 1 = \sin C_1^* \Rightarrow C_1^* = \frac{\pi}{2}, C_2^* = 2.$$

Отже, розв'язок задачі Коші має вигляд $\tilde{y} = 2 - \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$ або $\tilde{y} = 2 + \sin x$.

д) Тип даного рівняння той самий, що й в попередньому прикладі. В даному разі вигідніше застосувати підстановку $y' = q(y)$ (перевірте): $y'' = q \frac{dq}{dy}$,

$$2q \frac{dq}{dy} = q(1+q^2) \Rightarrow q = 0 \Rightarrow y = C, \quad 2 \frac{dq}{dy} = 1+q^2 \Rightarrow \frac{dq}{1+q^2} = \frac{dy}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \arctg q = \frac{y}{2} + C_1 \Rightarrow q = \tg\left(\frac{y}{2} + C_1\right) \Rightarrow y' = \tg\left(\frac{y}{2} + C_1\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ctg\left(\frac{y}{2} + C_1\right) dy = dx \Rightarrow 2 \ln \left| \sin\left(\frac{y}{2} + C_1\right) \right| = x + C_2 - \text{загальний інтеграл.}$$

Значення $C_1 = C_1^*$ та $C_2 = C_2^*$ довільних сталих знайдемо з початкових умов:

$$y(0) = \frac{\pi}{2} \Rightarrow 2 \ln \left| \sin \frac{\pi}{4} \right| = C_2^* \Rightarrow C_2^* = \ln \sin^2 \frac{\pi}{4} = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2,$$

$$y'(0) = 1 \Rightarrow 1 = \tg\left(\frac{\pi}{4} + C_1^*\right) \Rightarrow C_1^* = 0. \text{ Отже, розв'язок задачі Коші має}$$

вигляд $2 \ln \left| \sin \frac{y}{2} \right| = x - \ln 2$, розв'язок $y = C$ є особливим.

е) При розв'язанні задач Коші значення кожної з довільних сталих рекомендується знаходити з початкових умов одразу, як тільки ця стала з'являється в процесі розв'язання. Це демонструє даний приклад.

Рівняння відноситься до типу $F(y, y', y'') = 0$, отже, застосуємо підстановку

$$y' = q(y), y'' = q \frac{dq}{dy}: 3q^2 \frac{dq}{dy} = e^y \Rightarrow 3q^2 dq = e^y dy \Rightarrow q^3 = e^y + C_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y' = \sqrt[3]{e^y + C_1} \Rightarrow \frac{dy}{\sqrt[3]{e^y + C_1}} = dx. \quad \text{Спроба інтегрування отриманого}$$

рівняння приводить до інтеграла, що “не береться”. Врахуємо обидві початкові умови: $1 = \sqrt[3]{e^0 + C_1^*} \Rightarrow C_1^* = 0$. Зауважимо, що з цього місця шукаємо вже не

загальний, а частинний розв’язок. Тоді $\frac{dy}{\sqrt[3]{e^y}} = dx \Rightarrow e^{-\frac{y}{3}} dy = dx \Rightarrow$

$\Rightarrow -3e^{-\frac{y}{3}} = x + C_2$. Врахуємо тепер першу початкову умову і знайдемо значення C_2^* : $-3e^0 = -5 + C_2^* \Rightarrow C_2^* = 2$. Отже розв’язок задачі Коші має вигляд частинного інтеграла $-3e^{-\frac{y}{3}} = x + 2$.

Приклад 11. Розв’язати рівняння

а) $y'' + 3y' - 4y = 0$; б) $y'' - 16y' + 64y = 0$; в) $y'' - 6y' + 25y = 0$.

Розв’язання.

а) Маємо лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. Складемо характеристичне рівняння $\lambda^2 + 3\lambda - 4 = 0$. Його корені $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = -4$ дійсні і не дорівнюють один одному. Відповідно до цього фундаментальну систему розв’язків утворюють функції $y_1(x) = e^x$ й $y_2(x) = e^{-4x}$, а загальний розв’язок рівняння має вигляд $y(x) = C_1 e^x + C_2 e^{-4x}$, де C_1 й C_2 – довільні сталі.

б) Складемо характеристичне рівняння $\lambda^2 - 16\lambda + 64 = 0$. Його корені $\lambda_1 = 8 = \lambda_2$ дійсні і дорівнюють один одному. Отже, фундаментальну систему розв’язків утворюють функції $y_1(x) = e^{8x}$ й $y_2(x) = x e^{8x}$, а загальний розв’язок рівняння має вигляд $y(x) = e^{8x}(C_1 + C_2 x)$.

в) Складемо характеристичне рівняння $\lambda^2 - 6\lambda + 25 = 0$. Його корені $\lambda_{1,2} = 3 \pm \sqrt{9 - 25} = 3 \pm 4i$ комплексні спряжені. Отже, фундаментальну систему розв’язків утворюють функції $y_1(x) = e^{3x} \cos 4x$ й $y_2(x) = e^{3x} \sin 4x$, а загальний розв’язок рівняння має вигляд $y(x) = e^{3x}(C_1 \cos 4x + C_2 \sin 4x)$.

Приклад 12. Розв'язати задачу Коші

$$y'' + 12y' + 45y = 0, \quad y(0) = 5, \quad y'(0) = 3.$$

Розв'язання. Складемо характеристичне рівняння $\lambda^2 + 12\lambda + 45 = 0$. Його корені $\lambda_{1,2} = -6 \pm \sqrt{36 - 45} = -6 \pm 3i$ комплексні спряжені. Отже, фундаментальну систему розв'язків утворюють функції $y_1(x) = e^{-6x} \cos 3x$ й $y_2(x) = e^{-6x} \sin 3x$, а загальний розв'язок рівняння має вигляд $y(x) = e^{-6x} (C_1 \cos 3x + C_2 \sin 3x)$. Тоді

$$y'(x) = -6e^{-6x} (C_1 \cos 3x + C_2 \sin 3x) + e^{-6x} (-3C_1 \sin 3x + 3C_2 \cos 3x).$$

Знайдемо розв'язок задачі Коші, для чого обчислимо значення C_1^* й C_2^* з початкових умов: $y(0) = 5 \Rightarrow e^0 (C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0) = 5$,

$$y'(0) = 3 \Rightarrow -6e^0 (C_1 \cos 0 + C_2 \sin 0) + 3e^0 (-C_1 \sin 0 + C_2 \cos 0) = 3.$$

Отже, $C_1^* = 5$, $C_2^* = 11$ і розв'язок задачі Коші має вигляд

$$\tilde{y}(x) = e^{-6x} (5 \cos 3x + 11 \sin 3x).$$

Приклад 13. Розв'язати рівняння $y'' + 4y' + 4y = e^{-2x} \ln x$.

Розв'язання. Маємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами і правою частиною $f(x) = e^{-2x} \ln x$, яка неперервна на $(0, +\infty)$. Як відомо, загальний розв'язок такого рівняння має вигляд $y(x) = y_{одн}(x) + y^*(x)$, де $y_{одн}(x)$ – загальний розв'язок відповідного однорідного рівняння, а $y^*(x)$ – будь-який частинний розв'язок вихідного рівняння.

1) Знайдемо загальний розв'язок однорідного рівняння $y'' + 4y' + 4y = 0$: оскільки характеристичне рівняння $\lambda^2 + 4\lambda + 4 = 0$ має корені $\lambda_{1,2} = -2$, то фундаментальну систему розв'язків утворюють функції $y_1(x) = e^{-2x}$ й $y_2(x) = xe^{-2x}$, а загальний розв'язок рівняння має вигляд $y_{одн}(x) = e^{-2x} (C_1 + C_2 x)$.

2) Частинний розв'язок знайдемо методом варіації довільних сталих (методом Лагранжа), згідно з яким $y^*(x)$ подається у вигляді

$y^*(x) = D_1(x)y_1(x) + D_2(x)y_2(x)$. Невідомі функції $D_1(x)$ й $D_2(x)$ повинні задовольняти системі рівнянь $\begin{cases} D_1'(x)y_1(x) + D_2'(x)y_2(x) = 0 \\ D_1'(x)y_1'(x) + D_2'(x)y_2'(x) = f(x) \end{cases}$, лінійних

відносно $D_1'(x)$ й $D_2'(x)$. Оскільки головний визначник цієї системи

$W(x) = \begin{vmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{vmatrix}$ являє собою визначник Вронського, який відмінний від

нуля в даному випадку на $(0, +\infty)$, то система сумісна і має єдиний розв'язок, який знаходиться за правилом Крамера

$$D_1'(x) = -\frac{y_2(x)f(x)}{W(x)}, \quad D_2'(x) = \frac{y_1(x)f(x)}{W(x)}.$$

Після інтегрування отримуємо

$$D_1(x) = -\int \frac{y_2(x)f(x)}{W(x)} dx, \quad D_2(x) = \int \frac{y_1(x)f(x)}{W(x)} dx.$$

Отже,

$$W(x) = \begin{vmatrix} e^{-2x} & xe^{-2x} \\ -2e^{-2x} & e^{-2x}(1-2x) \end{vmatrix} = e^{-4x},$$

$$D_1(x) = -\int \frac{xe^{-2x}e^{-2x} \ln x}{e^{-4x}} dx = -\int x \ln x dx = -\frac{x^2}{2} \ln x + \frac{x^2}{4},$$

$$D_2(x) = \int \frac{e^{-2x}e^{-2x} \ln x}{e^{-4x}} dx = \int \ln x dx = x \ln x - x$$

(тут під символом інтеграла розуміємо первісну). Таким чином, частинний розв'язок має вигляд

$$y^*(x) = \left(-\frac{x^2}{2} \ln x + \frac{x^2}{4} \right) e^{-2x} + (x \ln x - x) xe^{-2x} = \left(\frac{x^2}{2} \ln x - \frac{3}{4} x^2 \right) e^{-2x},$$

а загальний розв'язок є $y(x) = \left(C_1 + C_2 x + \frac{x^2}{2} \ln x - \frac{3}{4} x^2 \right) e^{-2x}$.

Приклад 14. Вказати вигляд (без відшукування коефіцієнтів) частинного розв'язку рівняння.

- а) $y'' - y' = x^2 + 3x + 10$; б) $y'' + 6y' + 9y = (x^2 - x - 5)e^{-3x}$;
 в) $y'' + 9y = (x^3 - 3)\cos 3x$; г) $y'' - 8y' + 15y = 3\cos x - 5\sin x$;
 д) $y'' - 8y' + 16y = (2x + 1)e^{4x}\sin 2x$; е) $y'' - 2y' + 2y = e^x(x^2\cos x + 2\sin x)$.

Розв'язання. В усіх випадках маємо лінійні неоднорідні диференціальні рівняння зі сталими коефіцієнтами й правими частинами так званого “спеціального” вигляду $f(x) = e^{\alpha x}[P_m(x)\cos \beta x + Q_n(x)\sin \beta x]$, де $P_m(x)$ і $Q_n(x)$ – многочлени степенів m й n відповідно. Тоді частинний розв'язок рівняння *підбирається* у вигляді $y^*(x) = x^k e^{\alpha x}[R_s(x)\cos \beta x + T_s(x)\sin \beta x]$, де k – кратність контрольного числа правої частини $\sigma = \alpha + \beta i$ серед коренів характеристичного рівняння, а $R_s(x)$ і $T_s(x)$ – многочлени *одного й того ж* самого степеня $s = \max\{m, n\}$ з *невизначеними* коефіцієнтами. У таблиці наведені вигляди частинного розв'язку в залежності від правої частини (число k залежить також від лівої частини рівняння, а саме, від коренів характеристичного рівняння, і тому визначається окремо).

№	$f(x)$	σ	s	y^*
1.	$P_m(x)$	0	m	$x^k R_m(x)$
2.	$e^{\alpha x} P_m(x)$	α	m	$x^k e^{\alpha x} R_m(x)$
3.	$P_m(x)\cos \beta x$	βi	m	$x^k [R_m(x)\cos \beta x + T_m(x)\sin \beta x]$
4.	$Q_n(x)\sin \beta x$	βi	n	$x^k [R_n(x)\cos \beta x + T_n(x)\sin \beta x]$
5.	$P_m(x)\cos \beta x + Q_n(x)\sin \beta x$	βi	$\max\{m, n\}$	$x^k [R_s(x)\cos \beta x + T_s(x)\sin \beta x]$
6.	$e^{\alpha x} P_m(x)\cos \beta x$	$\alpha + \beta i$	m	$x^k e^{\alpha x} [R_m(x)\cos \beta x + T_m(x)\sin \beta x]$
7.	$e^{\alpha x} Q_n(x)\sin \beta x$	$\alpha + \beta i$	n	$x^k e^{\alpha x} [R_n(x)\cos \beta x + T_n(x)\sin \beta x]$
8.	$e^{\alpha x} [P_m(x)\cos \beta x + Q_n(x)\sin \beta x]$	$\alpha + \beta i$	$\max\{m, n\}$	$x^k e^{\alpha x} [R_s(x)\cos \beta x + T_s(x)\sin \beta x]$

а) Корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$. Судячи з правої частини, маємо випадок 1 (див. таблицю), де $f(x) = P_2(x) = x^2 + 3x + 10$, тобто $m = 2$. Оскільки $\sigma = 0$, то $k = 1; s = m = 2$. Отже, $y^* = x(Ax^2 + Bx + C)$.

б) Корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = \lambda_2 = -3$. Судячи з правої частини, маємо випадок 2 (див. таблицю), де $f(x) = (x^2 - x - 5)e^{-3x}$, тобто $m = 2$. Оскільки $\alpha = -3, \beta = 0$, то $\sigma = -3$, а $k = 2; s = m = 2$. Отже, $y^* = x^2 e^{-3x}(Ax^2 + Bx + C)$.

в) Корені характеристичного рівняння $\lambda_{1,2} = \pm 3i$. Судячи з правої частини, маємо випадок 3 (див. таблицю), де $f(x) = (x^3 - 3)\cos 3x$, тобто $m = 3$. Оскільки $\alpha = 0, \beta = 3$, то $\sigma = 3i$, а $k = 1; s = m = 3$. Отже, $y^* = x[(Ax^3 + Bx^2 + Cx + D)\cos 3x + (Ex^3 + Fx^2 + Gx + H)\sin 3x]$.

г) Корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = 5$. Судячи з правої частини, маємо випадок 5 (див. таблицю), де $f(x) = 3\cos x - 5\sin x$, тобто $m = n = 0$. Оскільки $\alpha = 0, \beta = 1$, то $\sigma = i$, а $k = 0; s = 0$. Отже, $y^* = A\cos x + B\sin x$.

д) Корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = \lambda_2 = 4$. Судячи з правої частини, маємо випадок 7 (див. таблицю), де $f(x) = (2x + 1)e^{4x}\sin 2x$, тобто $n = 1$. Оскільки $\alpha = 4, \beta = 2$, то $\sigma = 4 + 2i$, а $k = 0; s = n = 1$. Отже, $y^* = e^{4x}[(Ax + B)\cos 2x + (Cx + D)\sin 2x]$.

е) Корені характеристичного рівняння $\lambda_{1,2} = 1 \pm i$. Судячи з правої частини, маємо випадок 8 (див. таблицю), де $f(x) = e^x(x^2 \cos x + 2\sin x)$, тобто $m = 2, n = 0$. Оскільки $\alpha = 1, \beta = 1$, то $\sigma = 1 + i$, а $k = 1; s = \max\{2, 0\} = 2$. Отже, $y^* = xe^x[(Ax^2 + Bx + C)\cos x + (Dx^2 + Ex + F)\sin x]$.

Приклад 15. Розв'язати задачу Коші $y'' + 4y = \sin 2x, y(0) = y'(0) = 0$.

Розв'язання. Маємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого

порядку зі сталими коефіцієнтами і правою частиною “спеціального” вигляду $f(x) = \sin 2x$. Загальний розв’язок рівняння має вигляд $y(x) = y_{одн}(x) + y^*(x)$, де $y_{одн}(x)$ – загальний розв’язок відповідного однорідного рівняння, а $y^*(x)$ – будь-який частинний розв’язок вихідного рівняння.

1) Знайдемо загальний розв’язок однорідного рівняння $y'' + 4y = 0$: оскільки характеристичне рівняння $\lambda^2 + 4 = 0$ має корені $\lambda_{1,2} = \pm 2i$, то загальний розв’язок рівняння має вигляд $y_{одн}(x) = C_1 \cos 2x + C_2 \sin 2x$.

2) Судячи з правої частини, маємо випадок 4 (див. таблицю), де $f(x) = \sin 2x$, тобто $m = n = 0$. Оскільки $\alpha = 0$, $\beta = 2$, то $\sigma = 2i$, а $k = 1$; $s = 0$.

Отже, частинний розв’язок підбираємо у вигляді $y^* = x(A \cos 2x + B \sin 2x)$.

Знайдемо коефіцієнти A й B , для чого підставимо $y^{*'} та $y^{*''}$ у рівняння.$

Оскільки

$$y^{*'} = A \cos 2x + B \sin 2x + x(-2A \sin 2x + 2B \cos 2x) = (A + 2Bx) \cos 2x + (B - 2Ax) \sin 2x,$$

$$y^{*''} = 2B \cos 2x - 2(A + 2Bx) \sin 2x - 2A \sin 2x + 2(B - 2Ax) \cos 2x = 4[(B - Ax) \cos 2x - (A + Bx) \sin 2x],$$

то отримуємо рівність

$$4[(B - Ax) \cos 2x - (A + Bx) \sin 2x] + 4x(A \cos 2x + B \sin 2x) = \sin 2x$$

або $4B \cos 2x - 4A \sin 2x = \sin 2x$. Прирівняємо коефіцієнти при $\cos 2x$ та

$\sin 2x$ в обох частях рівності:
$$\begin{array}{l|l} \cos 2x & 4B = 0 \\ \sin 2x & -4A = 1 \end{array}$$
, звідки $A = -\frac{1}{4}$, $B = 0$. Отже,

частинний розв’язок має вигляд $y^* = -\frac{x}{4} \cos 2x$, а загальний розв’язок є

$$y(x) = C_1 \cos 2x + C_2 \sin 2x - \frac{x}{4} \cos 2x.$$

3) Знайдемо розв’язок задачі Коші, для чого обчислимо значення C_1^* й C_2^* з початкових умов: $y(0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0$;

$$y'(x) = -2C_1 \sin 2x + 2C_2 \cos 2x - \frac{1}{4} \cos 2x + \frac{x}{2} \sin 2x, \quad y'(0) = 0 \Rightarrow 2C_2 - \frac{1}{4} = 0.$$

Отже, $C_1^* = 0$, $C_2^* = \frac{1}{8}$ і шуканий розв’язок задачі Коші має вигляд

$$\tilde{y}(x) = \frac{1}{8} \sin 2x - \frac{x}{4} \cos 2x.$$

Приклад 16. Методом послідовного виключення невідомих розв'язати

системи рівнянь а) $\begin{cases} \dot{x} = x + 3y \\ \dot{y} = -x + 5y \end{cases};$ б) $\begin{cases} y' = y - z \\ z' = y + z + e^x \end{cases}.$

Розв'язання.

а) Маємо лінійну однорідну систему двох диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. З першого рівняння системи знаходимо $y = \frac{1}{3}(\dot{x} - x)$ (*), отже, $\dot{y} = \frac{1}{3}(\ddot{x} - \dot{x})$ (**). Підставивши у друге рівняння системи замість x та \dot{x} праві частини (*) та (**), отримаємо рівняння $\frac{1}{3}(\ddot{x} - \dot{x}) = -x + \frac{5}{3}(\dot{x} - x)$ або $\ddot{x} - 6\dot{x} + 8x = 0$. Його розв'язок має вигляд $x = C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$. Знайдемо тепер $\dot{x} = 2C_1 e^{2t} + 4C_2 e^{4t}$ і підставимо цей вираз в (*) разом із виразом для x . Будемо мати $y = \frac{1}{3}C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$. Отже, загальний розв'язок заданої системи складають функції $x = C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$, $y = \frac{1}{3}C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$. Після перепозначення довільної сталої $\frac{C_1}{3} \rightarrow C_1$ остаточно будемо мати $x = 3C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$, $y = C_1 e^{2t} + C_2 e^{4t}$.

б) Маємо лінійну неоднорідну систему двох диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. З першого рівняння системи знаходимо $z = y - y'$ (*), отже, $z' = y' - y''$ (**). Підставивши у друге рівняння системи замість z та z' праві частини (*) та (**), отримаємо рівняння $y' - y'' = y + y - y' + e^x$ або $y'' - 2y' + 2y = -e^x$ – неоднорідне лінійне диференціальне рівняння другого порядку з правою частиною спеціального вигляду. Розв'язавши це рівняння (див. попередній приклад), отримаємо $y = e^x (C_1 \cos x + C_2 \sin x - 1)$. Знайдемо тепер

$$y' = e^x [(C_1 + C_2) \cos x + (C_2 - C_1) \sin x - 1]$$

і підставимо цей вираз в (*) разом із виразом для y . Будемо мати $z = e^x(C_1 \sin x - C_2 \cos x)$. Отже, загальний розв'язок заданої системи складають функції $y = e^x(C_1 \cos x + C_2 \sin x - 1)$, $z = e^x(C_1 \sin x - C_2 \cos x)$.

Приклад 17. Встановити збіжність або довести розбіжність рядів

$$\begin{array}{lll} \text{а) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n(n+1)(n+2)}}; & \text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln n}{\sqrt[3]{n^2}}; & \text{в) } \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n \ln^2 n}}; \\ \text{г) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln n}{n^2}; & \text{д) } \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt[3]{n^2} \operatorname{arctg} \frac{1}{n^2}. & \end{array}$$

Розв'язання.

а) Оскільки $\frac{1}{\sqrt{n(n+1)(n+2)}} < \frac{1}{\sqrt{n \cdot n \cdot n}} = \frac{1}{n^{3/2}}$, а ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{3/2}}$ збігається як ряд

Діріхле при $\alpha = \frac{3}{2} > 1$, то за ознакою порівняння заданий ряд також збігається.

б) Для порівняння оберемо звичайний гармонічний ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$, який, як відомо, розбігається. Тоді за граничною ознакою порівняння із застосуванням правила Лопіталя будемо мати

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{\ln n}{\sqrt[3]{n^2}}}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[3]{n}}{\ln n} \left\{ \frac{\infty}{\infty} \right\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{3 \sqrt[3]{n^2}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{n}} = \frac{1}{3} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[3]{n} = \infty.$$

Отже, на підставі цієї ознаки, заданий ряд розбігається.

в) Для порівняння оберемо ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n \ln^2 n}$, який збігається, оскільки

$p = 2 > 1$. Тоді за граничною ознакою порівняння із застосуванням правила

Лопіталя будемо мати $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sqrt{n \ln^2 n}}}{\frac{1}{n \ln^2 n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} = \infty$. Оскільки

границя нескінченна, то ознака незастосовна. Це означає, що ряд для

порівняння обраний невдало. Порівняння ж з гармонічним рядом $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ показує, що даний ряд *розбігається* (виконайте самостійно).

г) Спроби порівняння даного ряду з розбіжним гармонічним рядом $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ або

збіжним рядом Діріхле $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ виявляються невдалими (перевірте!). Тому для

порівняння оберемо (збіжний) ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\beta}}$, де $1 < \beta < 2$. Візьмемо, наприклад,

$\beta = 3/2$. Тоді за ознакою порівняння із застосуванням правила Лопітала будемо мати

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{\ln n}{n^2}}{\frac{1}{n^{3/2}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\sqrt{n}} \left\{ \frac{\infty}{\infty} \right\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n}} = 0.$$

Отже, за граничною ознакою порівняння заданий ряд *збігається*.

д) При дослідженні рядів дуже корисною може виявитися **таблиця еквівалентних нескінченно малих**:

якщо $\alpha(n) \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, то

$$\sin \alpha(n) \sim \alpha(n),$$

$$\arcsin \alpha(n) \sim \alpha(n),$$

$$\operatorname{tg} \alpha(n) \sim \alpha(n),$$

$$\operatorname{arctg} \alpha(n) \sim \alpha(n),$$

$$\ln[1 + \alpha(n)] \sim \alpha(n),$$

$$b^{\alpha(n)} - 1 \sim \ln b \cdot \alpha(n),$$

$$e^{\alpha(n)} - 1 \sim \alpha(n).$$

Оскільки $\frac{1}{n^2} \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, то на підставі наведеної таблиці, $\operatorname{arctg} \frac{1}{n^2} \sim \frac{1}{n^2}$.

Тоді $\sqrt[3]{n^2} \operatorname{arctg} \frac{1}{n^2} \sim \sqrt[3]{n^2} \frac{1}{n^2} = \frac{1}{n^{4/3}}$. Це означає, що якщо за ряд для порівняння

обрати *збіжний* ряд Діріхле $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{4/3}}$ ($\alpha = \frac{4}{3} > 1$), то за граничною ознакою

порівняння отримаємо $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[3]{n^2} \operatorname{arctg} \frac{1}{n^2}}{\frac{1}{n^{4/3}}} = 1$. Тоді за наслідком з цієї

ознаки заданий ряд збігається.

Приклад 18. Встановити збіжність або довести розбіжність рядів

а) $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)!!}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (3n+1)}$; б) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!3^n}{n^n}$; в) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n^2+5}{n^2+6} \right)^{n^3}$;
 г) $\sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{arctg}^n \frac{\sqrt{3n+2}}{\sqrt{n+1}}$; д) $\frac{1}{2^3} + \frac{2}{3^3} + \frac{3}{4^3} + \dots$

Розв'язання.

а) Оскільки $a_n = \frac{(2n+1)!!}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (3n+1)}$, то

$$a_{n+1} = \frac{[2(n+1)+1]!!}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot [(3(n+1)+1)]} = \frac{(2n+3)!!}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (3n+4)} = \frac{(2n+1)!!(2n+3)}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot (3n+1) \cdot (3n+4)}$$

і тоді $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n+3}{3n+4} = \frac{2}{3} < 1$. Отже, за ознакою Д'Аламбера заданий ряд збігається.

б) Оскільки $a_n = \frac{n!3^n}{n^n}$, то $a_{n+1} = \frac{(n+1)!3^{n+1}}{(n+1)^{n+1}} = \frac{n!(n+1)3^n \cdot 3}{(n+1)^n(n+1)}$.

Отже, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{n+1} \right)^n = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^{-n} = \frac{3}{e} > 1$. Таким чином, за ознакою Д'Аламбера заданий ряд розбігається.

в) Оскільки $a_n = \left(\frac{n^2+5}{n^2+6} \right)^{n^3}$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n^2+5}{n^2+6} \right)^{n^2} \{1^\infty\} =$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} e^a, \text{ де } a = \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\frac{n^2+5}{n^2+6} - 1 \right) = - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^2+6} = -1. \text{ Отже, } \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} =$$

$= e^{-1} = \frac{1}{e} < 1$ і за ознакою Коші заданий ряд збігається.

г) Оскільки $a_n = \operatorname{arctg}^n \frac{\sqrt{3n+2}}{\sqrt{n+1}}$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3n+2}}{\sqrt{n+1}} =$
 $= \operatorname{arctg} \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{3n+2}{n+1}} = \operatorname{arctg} \sqrt{3} = \frac{\pi}{3} > 1$. Отже, за ознакою Коші заданий ряд розбігається.

д) Загальний член ряду, як неважко бачити, $a_n = \frac{n}{(n+1)^3}$. За ознакою

Д'Аламбера маємо $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n+1}{(n+2)^3}}{\frac{n}{(n+1)^3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^4}{n(n+2)^3} = 1$, отже, на

підставі цієї ознаки ніякого висновку про збіжність ряду зробити не можна (ознака незастосовна). До того ж самого результату приводить спроба застосування радикальної ознаки Коші.

Будемо розглядати члени ряду як значення функції $f(x) = \frac{x}{(x+1)^3}$ при

значеннях аргументу $x = 1, 2, 3, \dots$. Неважко перевірити, що при $x \geq 1$ функція $f(x)$ додатна, неперервна й монотонно спадна, тобто задовольняє умови інтегральної ознаки. Тому дослідимо на збіжність невласний інтеграл

$\int_1^{+\infty} \frac{x}{(x+1)^3} dx$. В даному випадку за означенням маємо:

$$\begin{aligned} \int_1^{+\infty} \frac{x}{(x+1)^3} dx &= \lim_{B \rightarrow +\infty} \int_1^B \frac{x}{(x+1)^3} dx = \lim_{B \rightarrow +\infty} \int_1^B \left[\frac{1}{(x+1)^2} - \frac{1}{(x+1)^3} \right] dx = \\ &= \lim_{B \rightarrow +\infty} \left[-\frac{1}{x+1} + \frac{1}{2(x+1)^2} \right] \Big|_1^B = \lim_{B \rightarrow +\infty} \left[-\frac{1}{B+1} + \frac{1}{2(B+1)^2} \right] - \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{8} \right) = \frac{3}{8}. \end{aligned}$$

Отже, інтеграл набуває скінченного значення, тобто збігається. Тому за інтегральною ознакою одночасно з ним збігається і заданий ряд.

Приклад 19. Встановити характер збіжності або довести розбіжність рядів

а) $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{3 \cdot 6 \cdot \dots \cdot (3n)}{(n+1)!} \operatorname{arctg} \frac{1}{2^n}$; б) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)(\sqrt{n+1}-1)}$; в) $\sum_{n=4}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\ln \ln n}$.

Розв'язання.

а) Дослідимо заданий знакопочережний ряд на абсолютну збіжність, для чого розглянемо ряд з абсолютних величин членів заданого ряду

$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3 \cdot 6 \cdot \dots \cdot (3n)}{(n+1)!} \operatorname{arctg} \frac{1}{2^n}$ (*). За ознакою Д'Аламбера маємо

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{3 \cdot 6 \cdot \dots \cdot (3n) \cdot (3n+3)}{(n+2)!} \operatorname{arctg} \frac{1}{2^{n+1}}}{\frac{3 \cdot 6 \cdot \dots \cdot (3n)}{(n+1)!} \operatorname{arctg} \frac{1}{2^n}} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n+3}{n+2} = \frac{3}{2} > 1$$

(тут враховано, що $\operatorname{arctg} \frac{1}{2^n} \sim \frac{1}{2^n}$ при $n \rightarrow \infty$). Отже, ряд (*) розбігається за ознакою Д'Аламбера. Тому заданий ряд *не збігається абсолютно*. А оскільки цей результат отриманий на підставі ознаки Д'Аламбера, то необхідна умова збіжності ряду $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ (а з нею і друга умова ознаки Лейбніца) не виконується. Це означає, що заданий ряд *розбігається*.

б) Дослідимо заданий знакопочережний ряд на абсолютну збіжність, для чого розглянемо ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n+1)(\sqrt{n+1}-1)}$ (*), складений з абсолютних величин членів

заданого ряду. Порівняємо цей ряд зі збіжним рядом Діріхле $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{n}}$,

застосувавши граничну ознаку порівняння:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(n+1)(\sqrt{n+1}-1)}}{\frac{1}{n\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n\sqrt{n}}{(n+1)(\sqrt{n+1}-1)} = 1. \text{ Отже, за наслідком зі}$$

згаданої ознаки обидва ряди поведуться однаково, тобто ряд (*) збігається. А це означає, що заданий ряд *збігається абсолютно*.

в) Дослідимо заданий знакопочережний ряд на абсолютну збіжність, для чого розглянемо ряд з абсолютних величин членів заданого ряду $\sum_{n=4}^{\infty} \frac{1}{\ln \ln n}$ (*).

Оскільки $\ln n < n$, а $\ln \ln n \ll n$, то $\frac{1}{\ln \ln n} \gg \frac{1}{n}$. Тому за ознакою порівняння ряд (*) розбігається, отже, заданий ряд *не збігається абсолютно* (тут ми врахували, що гармонічний ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ розбігається). Оскільки цей результат отриманий не за ознакою Д'Аламбера або радикальною ознакою Коші, то ми повинні дослідити ряд також на умовну збіжність.

Перевіримо виконання умов ознаки Лейбніца:

1) нерівність $\frac{1}{\ln \ln(n+1)} < \frac{1}{\ln \ln n}$ виконується $\forall n \geq 4$; 2) $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln \ln n} = 0$.

Обидві умови виконуються, отже, за ознакою Лейбніца заданий ряд збігається. А оскільки він не збігається абсолютно, то він *збігається умовно*.

Приклад 20. Знайти радіуси та інтервали збіжності степеневих рядів:

а) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n 3^n (x+2)^n}{(2n+1)(n+2)}$; б) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^{2n^3} (x-1)^n$; в) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!(2n)!}{(3n)!} x^n$;
 г) $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(x+5)^n}{n^n}$; д) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{3^n} (x-1)^n$; е) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+2}{n}\right)^n \frac{(2n)!(x+3)^{2n+3}}{(n!)^2}$.

Розв'язання.

а) Оскільки $|a_n| = \left| \frac{(-1)^n 3^n}{(2n+1)(n+2)} \right| = \frac{3^n}{(2n+1)(n+2)}$, то за формулою

$\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$ маємо $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3^{n+1}(2n+1)(n+2)}{(2n+3)(n+3)3^n} = 3$, звідки $R = \frac{1}{3}$. Отже,

інтервал збіжності даного ряду є $|x+2| < \frac{1}{3}$ або $-\frac{1}{3} < x+2 < \frac{1}{3}$, тобто

$-\frac{7}{3} < x < -\frac{5}{3}$.

б) Оскільки $|a_n| = \left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^{2n^3} = \left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^{2n^3}$, то за формулою $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$

маємо $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^{2n^3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n^2}\right)^{2n^2} = e^2$, звідки $R = \frac{1}{e^2}$. Отже,

інтервал збіжності даного ряду є $|x-1| < \frac{1}{e^2}$ або $1 - \frac{1}{e^2} < x < 1 + \frac{1}{e^2}$.

в) Оскільки $|a_n| = \frac{n!(2n)!}{(3n)!}$, то з формули $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n!(2n)!}{(3n)!}}{\frac{(n+1)![2(n+1)]!}{[3(n+1)]!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(3n+1)(3n+2)(3n+3)}{(n+1)(2n+1)(2n+2)} = \frac{27}{4}.$$

Отже, інтервал збіжності даного ряду є $|x| < \frac{27}{4}$.

г) Оскільки $|a_n| = \frac{1}{n^n}$, то з формули $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$ маємо

$$R = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{1}{n^n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} n = \infty. \text{ Це означає, що ряд абсолютно збігається на усій}$$

числовій осі.

д) З формули $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$ маємо $R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n!}{3^n}}{\frac{(n+1)!}{3^{n+1}}} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(n+1)} = 0$. Це

означає, що ряд збігається в єдиній точці $x=1$ (інтервал збіжності вироджується в точку).

е) Тут показник степеня є лінійною функцією $\varphi(n) = 2n+3$. Радіус збіжності

визначимо з формули $R = \lim_{n \rightarrow \infty} k \sqrt[k]{\frac{|a_n|}{|a_{n+1}|}}$ для $\varphi(n) = kn+m$, де $(k \geq 2) \in \mathbb{N}$,

а m – ціле невід'ємне число (може дорівнювати 0), поклавши $k=2$:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\left(\frac{n+2}{n}\right)^n \frac{(2n)!}{(n!)^2}}{\left(\frac{n+3}{n+1}\right)^{n+1} \frac{(2n+2)!}{[(n+1)!]^2}} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{(n+2)(n+1)}{n(n+3)}\right]^n \frac{(n+1)^3}{(n+3)(2n+1)(2n+2)}} =$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{n+2}{n+3}\right)^n \left(\frac{n+1}{n}\right)^n \cdot \frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{e}} \cdot \sqrt{e} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2}.$$

Отже, ряд збігається в інтервалі $|x+3| < \frac{1}{2}$ або $-\frac{7}{2} < x < -\frac{5}{2}$.

Зауваження. Можна було б обчислити одразу інтервал збіжності безпосередньо за ознакою Д'Аламбера, тобто скориставшись нерівністю

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1} x^{\varphi(n+1)}}{a_n x^{\varphi(n)}} \right| < 1:$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1} x^{\varphi(n+1)}}{a_n x^{\varphi(n)}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\left(\frac{n+3}{n+1}\right)^{n+1} \frac{(2n+2)! (x+3)^{2n+5}}{[(n+1)!]^2}}{\left(\frac{n+2}{n}\right)^n \frac{(2n)! (x+3)^{2n+3}}{(n!)^2}} \right| =$$

$$= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+3}{n+2}\right)^n \left(\frac{n}{n+1}\right)^n \frac{(n+3)(2n+1)(2n+2)}{(n+1)^3} |x+3|^2 = e \cdot \frac{1}{e} \cdot 4 \cdot |x+3|^2 < 1.$$

Отже, отримали той самий інтервал збіжності $|x+3| < \frac{1}{2}$.

Приклад 21. Знайти область збіжності степеневого ряду

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{3^{n+2} \sqrt{n \ln n}}.$$

Розв'язання. З формули $\frac{1}{R} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$ маємо

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{3^{n+2} \sqrt{n \ln n}}}{\frac{1}{3^{n+3} \sqrt{n+1 \ln(n+1)}}} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n+1}} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(n+1)}{\ln n} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = 3$$

(тут ми використали правило Лопіталя). Отже, ряд збігається в інтервалі $|x| < 3$.

Дослідимо поведінку ряду в межових точках $x = \pm 3$ цього інтервалу.

В точці $x = -3$ маємо знакопозначений числовий ряд

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n 3^n}{3^{n+2} \sqrt{n \ln n}} = \frac{1}{9} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n \ln n}}. \text{ Дослідимо його на абсолютну збіжність, для}$$

чого розглянемо знакододатний ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \left| \frac{(-1)^n}{\sqrt{n \ln n}} \right| = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n \ln n}}$. Порівняємо цей

ряд із розбіжним гармонічним рядом $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$. За “граничною” ознакою

порівняння $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sqrt{n \ln n}}}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{2\sqrt{n}}{1}} = \infty$ (тут ми знов використали

правило Лопіталя). Оскільки границя існує і нескінченна, то за згадану

ознакою в точці $x = -3$ ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n \ln n}}$ розбігається, отже, знакопозначений

ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n \ln n}}$ не збігається абсолютно. В той же час цей ряд збігається за

ознакою Лейбніца, оскільки, як неважко перевірити, обидві умови ознаки

виконуються. Тому ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n \ln n}}$, а разом з ним і заданий степеневий ряд

$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{x^n}{3^{n+2} \sqrt{n \ln n}}$, збігаються умовно.

В точці $x = 3$ маємо знакододатний ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{3^n}{3^{n+2} \sqrt{n \ln n}} = \frac{1}{9} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n \ln n}}$,

який, як вже з’ясовано, розбігається. Отже, в точці $x = 3$ заданий степеневий ряд розбігається.

Таким чином, областю збіжності заданого степеневого ряду є півінтервал $[-3, 3)$, всередині якого ряд збігається абсолютно, на лівому кінці – умовно.

Приклад 22. Розвинути функцію в ряд Маклорена та вказати область, в якій це розвинення справедливе.

$$\text{а) } f(z) = x^4 \sin(3x^2); \quad \text{б) } f(x) = \frac{1}{1+x^5}; \quad \text{в) } f(x) = \frac{2x-5}{x^2-5x+6};$$

$$\text{г) } f(x) = \frac{1}{(1-x^3)^2}; \quad \text{д) } f(x) = \arcsin \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}.$$

Розв'язання.

а) Безпосереднє розвинення приведе до громіздких обчислень. В цьому випадку скористаємось способом, що передбачає використання так званих *найпростіших розвинень*.

Найпростішими розвиненнями називають відомі розвинення в ряд Маклорена основних елементарних функцій. Наведемо *таблицю найпростіших розвинень* (у дужках вказані області збіжності відповідних рядів):

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (-\infty < x < +\infty),$$

$$a^x = e^{x \ln a} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\ln^n a}{n!} x^n \quad (-\infty < x < +\infty),$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (-\infty < x < +\infty),$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} \quad (-\infty < x < +\infty),$$

$$\text{sh } x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots + \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (-\infty < x < +\infty),$$

$$\text{ch } x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots + \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!}$$

$$(-\infty < x < +\infty),$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n}$$

$$(-1 < x \leq 1),$$

$$(1+x)^{\alpha} = 1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2!} x^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} x^3 + \dots$$

$$\dots + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-n+1)}{n!} x^n + \dots = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\prod_{k=1}^n (\alpha-k+1)}{n!} x^n$$

$$(-1 < x < 1 \text{ якщо } \alpha \leq -1, -1 < x \leq 1 \text{ якщо } -1 < \alpha < 0, -1 \leq x \leq 1 \text{ якщо } \alpha \geq 0),$$

зокрема,

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^n x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad (-1 < x < 1),$$

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots + x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \quad (-1 < x < 1),$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} x^2 - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} x^3 + \dots = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} x^n$$

$$(-1 < x \leq 1),$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} x^2 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} x^3 + \dots = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} x^n$$

$$(-1 < x \leq 1),$$

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{1}{2 \cdot 4} x^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} x^3 - \dots = 1 + \frac{x}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n+2)!!} x^{n+1}$$

$$(-1 \leq x \leq 1),$$

$$\sqrt{1-x} = 1 - \frac{x}{2} - \frac{1}{2 \cdot 4} x^2 - \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} x^3 - \dots = 1 - \frac{x}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n+2)!!} x^{n+1}$$

$$(-1 \leq x \leq 1),$$

$$\arcsin x = x + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^3}{3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \cdot \frac{x^5}{5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \cdot \frac{x^7}{7} + \dots = x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{x^{2n+1}}{2n+1}$$

$$(-1 \leq x \leq 1),$$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \quad (-1 \leq x \leq 1).$$

Тому скористаємось відомим розвиненням в ряд Маклорена функції $\sin x$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (-\infty < x < +\infty),$$

в якому замінимо x на $3x^2$, і отриманий ряд почленно помножимо на x^4 :

$$\sin(3x^2) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(3x^2)^{2n+1}}{(2n+1)!} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{3^{2n+1} x^{4n+2}}{(2n+1)!},$$

$$f(z) = x^4 \sin(3x^2) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{3^{2n+1} x^{4n+6}}{(2n+1)!} = 3x^6 - \frac{9}{2}x^{10} + \frac{81}{40}x^{14} - \dots$$

Отримане розвинення справедливе на усій числовій осі $(-\infty < x < +\infty)$;

б) Замінимо у відомому розвиненні

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^n x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad (-1 < x < 1),$$

x на x^5 . Маємо

$$\frac{1}{1+x^5} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (x^5)^n = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{5n} = 1 - x^5 + x^{10} - x^{15} + \dots + (-1)^n x^{5n} + \dots$$

Цей ряд подає задану функцію для усіх x таких, що $|x^5| < 1$, тобто $-1 < x < 1$.

в) В деяких випадках розвинення функції в степеневий ряд можна отримати, просумувавши табличні розвинення або раніше знайдені. При цьому іноді треба тотожно перетворити функцію таким чином, щоб подати її у вигляді зручної комбінації функцій, розвинення яких відомі.

Задана функція є правильним раціональним дробом. У відповідності із розкладанням знаменника на множники $x^2 - 5x + 6 = (x-2)(x-3)$ подамо її у вигляді суми найпростіших дробів:

$$\frac{2x-5}{x^2-5x+6} = \frac{2x-5}{(x-2)(x-3)} = \frac{A}{x-2} + \frac{B}{x-3}, \quad \text{звідки} \quad 2x-5 = A(x-3) + B(x-2).$$

Невідомі коефіцієнти A і B знайдемо з системи рівнянь

$$\begin{array}{l} x=2 \quad | -1 = -A, \\ x=3 \quad | 1 = B. \end{array}$$

Отже, $A = B = 1$ й $f(x) = \frac{2x-5}{x^2-5x+6} = \frac{1}{x-2} + \frac{1}{x-3}$. Кожен з отриманих

найпростіших дробів після нескладного тотожного перетворення розвинемо в ряд Маклорена за допомогою відомого розвинення

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots + x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \quad (-1 < x < 1).$$

Будемо мати

$$\frac{1}{x-2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{1-\frac{x}{2}} = -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{x}{2}\right)^n \quad \left(\left|\frac{x}{2}\right| < 1 \Rightarrow |x| < 2\right),$$

$$\frac{1}{x-3} = -\frac{1}{3} \frac{1}{1-\frac{x}{3}} = -\frac{1}{3} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{x}{3}\right)^n \quad \left(\left|\frac{x}{3}\right| < 1 \Rightarrow |x| < 3\right).$$

Отже,

$$\frac{2x-5}{x^2-5x+6} = -\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2^{n+1}} + \frac{1}{3^{n+1}}\right) x^n = -\frac{5}{6} - \frac{13}{36}x - \frac{35}{216}x^2 - \dots$$

За відповідною властивістю степеневих рядів отримане розвинення справедливе в інтервалі $(-2, 2)$, який є спільним інтервалом збіжності обох рядів.

г) При розвиненні деяких функцій в степеневі ряди дуже корисним виявляється спосіб, що заснований на використанні такої властивості степеневих рядів, як можливість їх почленного диференціювання. Суть цього способу полягає в наступному. Нехай треба знайти розвинення деякої функції $f(x)$ в степеневий ряд. Якщо вдається знайти таку функцію $g(x)$, що $f(x) = a \cdot x^k \cdot g'(x)$, де $k \in \mathbb{Z}$, то, розвинувши функцію $g(x)$ в степеневий ряд і продиференціювавши його почленно, отримаємо розвинення в ряд функції $f(x)$. При цьому отримане розвинення справедливе всюди, де відповідне розвинення було вірним для функції $g(x)$.

Оскільки в даному випадку $\frac{1}{(1-x^3)^2} = \frac{1}{3x^2} \left(\frac{1}{1-x^3} \right)'$, то, замінивши у табличному розвиненні

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots + x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \quad (-1 < x < 1)$$

x на x^3 , отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1-x^3)^2} &= \frac{1}{3x^2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (x^3)^n \right)' = \frac{1}{3x^2} \sum_{n=1}^{\infty} 3n x^{3n-1} = \sum_{n=1}^{\infty} n x^{3n-3} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) x^{3n} = \\ &= 1 + 2x^3 + 3x^6 + \dots \end{aligned}$$

Оскільки при диференціюванні інтервал збіжності степеневого ряду не змінюється, то знайдене розвинення справедливе при усіх x з інтервалу $-1 < x < 1$

д) В деяких випадках значно простіше розвинути в степеневий ряд не саму функцію $f(x)$, а її похідну $f'(x)$, і отриманий ряд почленно проінтегрувати.

$$\text{Знайдемо похідну } f'(x) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{x^2}{1+x^2}}} \cdot \frac{\sqrt{1+x^2} - \frac{x \cdot 2x}{2\sqrt{1+x^2}}}{1+x^2} = \frac{1}{1+x^2}.$$

У табличному розвиненні

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^n x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad (-1 < x < 1)$$

замінимо x на x^2 і отримаємо розвинення $f'(x) = \frac{1}{1+x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n}$, вірне при $-1 < x < 1$.

Проінтегрувавши цей ряд почленно від 0 до x , будемо мати

шукане розвинення $f(x) = \arcsin \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}$. Оскільки при

почленному інтегруванні ряду інтервал його збіжності не змінюється, то знайдене розвинення справедливе при усіх x з інтервалу $-1 < x < 1$.

Приклад 23. Розвинути в ряд Тейлора в околі точки $x_0 = 4$ (за степенями різниці $x - 4$) функцію $f(x) = \ln(x^2 + 4x - 5)$ та вказати область, в якій це розвинення справедливе.

Розв'язання. Перетворимо тотожно задану функцію, виділяючи різницю $x - 4$:

$$\begin{aligned} f(x) &= \ln(x^2 + 4x - 5) = \ln[(x - 1)(x + 5)] = \ln\{[3 + (x - 4)][9 + (x - 4)]\} = \\ &= \ln\left[27\left(1 + \frac{x - 4}{3}\right)\left(1 + \frac{x - 4}{9}\right)\right] = \ln 27 + \ln\left(1 + \frac{x - 4}{3}\right) + \ln\left(1 + \frac{x - 4}{9}\right). \end{aligned}$$

Скористаємось табличним розвиненням

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} \quad (-1 < x \leq 1),$$

в якому замінимо x на $\frac{x - 4}{3}$ й на $\frac{x - 4}{9}$. Отримаємо

$$\ln\left(1 + \frac{x - 4}{3}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{(x - 4)^n}{n 3^n} \quad \left(\left|\frac{x - 4}{3}\right| < 1 \Rightarrow |x - 4| < 3\right),$$

$$\ln\left(1 + \frac{x - 4}{9}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{(x - 4)^n}{n 9^n} \quad \left(\left|\frac{x - 4}{9}\right| < 1 \Rightarrow |x - 4| < 9\right).$$

Отже,

$$\begin{aligned} f(x) &= \ln(x^2 + 4x - 5) = \ln 27 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1 + 3^n}{n 9^n} (x - 4)^n = \\ &= \ln 27 + \frac{4}{9}(x - 4) - \frac{5}{9^2}(x - 4)^2 + \frac{28}{3 \cdot 9^3}(x - 4)^3 - \dots \end{aligned}$$

Отримане розвинення справедливе в інтервалі $|x - 4| < 3$, який є спільним інтервалом збіжності рядів $\ln\left(1 + \frac{x - 4}{3}\right)$ та $\ln\left(1 + \frac{x - 4}{9}\right)$.

Приклад 24. Розвинути в ряд Маклорена функцію $f(x) = \int_0^x \frac{\operatorname{arctg} t}{t} dt$.

Розв'язання. При наближеному обчисленні визначених інтегралів, коли знайти первісну в скінченному вигляді не представляється можливим, широко

застосовується почленне інтегрування степеневого ряду. При цьому підінтегральну функцію розвивають в ряд, який потім інтегрують почленно.

Скориставшись табличним розвиненням

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \quad (-1 \leq x \leq 1),$$

будемо мати

$$\begin{aligned} f(x) &= \int_0^x \frac{\operatorname{arctg} t}{t} dt = \int_0^x \frac{1}{t} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{t^{2n+1}}{2n+1} dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{2n+1} \int_0^x t^{2n} dt = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)^2}. \end{aligned}$$

Оскільки $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{arctg} x}{x} = 1$, то розвинення справедливе в інтервалі

$$-1 < x < 1.$$

Приклад 25. Обчислити $\int_0^{\frac{1}{2}} e^{-x^3} dx$ з точністю $\delta = 10^{-4}$.

Розв'язання. Прийmemo залишкову похибку $\varepsilon = \frac{\delta}{4} = \frac{1}{4} \cdot 10^{-4} = 2.5 \cdot 10^{-5}$ і

розвинемо підінтегральну функцію в ряд Маклорена, для чого у табличному розвиненні

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (-\infty < x < +\infty)$$

замінімо x на $-x^3$:

$$e^{-x^3} = 1 - x^3 + \frac{x^6}{2!} - \frac{x^9}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{x^{3n}}{n!} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{3n}}{n!}.$$

Отриманий ряд збігається на всій числовій осі, отже, його можна почленно інтегрувати на будь-якому відрізку, зокрема, на відрізку $\left[0, \frac{1}{2}\right]$. Після

інтегрування і застосування формули Ньютона-Лейбніца приходимо до знакопозначеного числового ряду, який збігається, тобто є рядом Лейбніца:

$$\int_0^{\frac{1}{2}} e^{-x^3} dx = \int_0^{\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{3n}}{n!} dx = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n!} \int_0^{\frac{1}{2}} x^{3n} dx = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n!(3n+1)} x^{3n+1} \Big|_0^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n!(3n+1)8^n} = \frac{1}{2} - \frac{1}{8 \cdot 8} + \frac{1}{2! \cdot 14 \cdot 8^2} - \frac{1}{3! \cdot 20 \cdot 8^3} + \dots$$

Для забезпечення необхідної точності обчислення суми цього ряду, яка і є значенням заданого визначеного інтеграла, потрібно утримати таке число членів ряду, щоб виконалася умова $|u_{n+1}| \leq \varepsilon$, де u_{n+1} – перший з відкинутих членів, а ε – задана залишкова похибка.

Оскільки $u_0 = 0.5$, $u_1 = -0.015625$, $u_2 = 0.0005580$, $u_3 = -0.0000163$, ... й $|u_3| < \varepsilon = 0.000025$, то треба утримати 3 перших члени ряду:

$$\int_0^{\frac{1}{2}} e^{-x^3} dx \approx 0.5 - 0.015625 + 0.0005580 = 0.4849330 \approx 0.4849.$$

Значення цього інтеграла, обчислене на комп'ютері за допомогою **Mathcad**, дорівнює **0.48491714311364 ...**, тобто в отриманому результаті всі знаки вірні.

Приклад 26. Знайти чотири перших, відмінних від нуля, члени розвинення в степеневий ряд розв'язку рівняння $y'' = x \sin y'$, який задовольняє початкові умови $y(1) = 0$, $y'(1) = \frac{\pi}{2}$.

Розв'язання. Будемо шукати частинний розв'язок рівняння у вигляді ряду Тейлора

$$\tilde{y} = y(1) + y'(1)(x-1) + \frac{y''(1)}{2!}(x-1)^2 + \dots$$

За умовою задачі, $y(1) = 0$, $y'(1) = \frac{\pi}{2}$. З рівняння $y'' = x \sin y'$ знаходимо, що $y''(1) = 1 \cdot \sin y'(1) = 1 \cdot 1 = 1$. Диференціюючи вихідне рівняння, маємо

$$y''' = \sin y' + xy'' \cos y',$$

звідки отримуємо $y'''(1) = \sin y'(1) + 1 \cdot y''(1) \cdot \cos y'(1) = 1 + 1 \cdot 1 \cdot 0 = 1$.

Диференціюючи рівність $y''' = \sin y' + xy'' \cos y'$, маємо

$$y^{(4)} = y'' \cos y' + y'' \cos y' + xy''' \cos y' - xy'' y''' \sin y',$$

звідки отримуємо $y^{(4)}(1) = 2 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 0 - 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = -1$.

Отже, шуканий частинний розв'язок має вигляд

$$\tilde{y} = \frac{\pi}{2}(x-1) + \frac{1}{2!}(x-1)^2 + \frac{1}{3!}(x-1)^3 - \frac{1}{4!}(x-1)^4 + \dots$$

Приклад 27. Розвинути в ряд Фур'є періодичну функцію

$$f(x) = \begin{cases} x/3, & -3 \leq x \leq 0, \\ 3-x, & 0 < x \leq 3 \end{cases}, \text{ задану на проміжку, довжина якого дорівнює}$$

періоду.

Розв'язання. Графік функції наведений на рис. 7. Судячи з умови, період функції $T = 2l = 6$, тобто напівперіод $l = 3$. Функція $f(x)$ не є ані парною, ані непарною, і на відрізку $[-3, 3]$, де вона задана, є неперервною, за винятком однієї точки розриву першого роду $x = 0$. Отже, $f(x)$ задовольняє умови теореми

Діріхле. Тому відповідний ряд Фур'є має вигляд $\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l}$,

де $a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx$, $a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx$, $b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx$. Цей ряд

збігається в кожній точці відрізка $[-l, l]$, причому сума ряду $S(x) = f(x)$ у

точках неперервності функції $f(x)$, $S(x) = \frac{1}{2} \left[\lim_{t \rightarrow x+0} f(t) + \lim_{t \rightarrow x-0} f(t) \right]$ у точках

розриву, $S(\pm l) = \frac{1}{2} \left[\lim_{t \rightarrow -l+0} f(t) + \lim_{t \rightarrow l-0} f(t) \right]$ на кінцях відрізка $[-l, l]$.

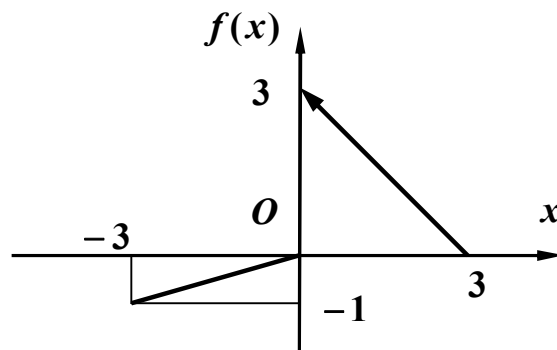


Рис. 7

Обчислимо коефіцієнти ряду:

$$a_0 = \frac{1}{3} \int_{-3}^3 f(x) dx = \frac{1}{3} \left[\int_{-3}^0 \frac{x}{3} dx + \int_0^3 (3-x) dx \right] = 1,$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{3} \int_{-3}^3 f(x) \cos \frac{n\pi x}{3} dx = \frac{1}{3} \left[\int_{-3}^0 \frac{x}{3} \cos \frac{n\pi x}{3} dx + \int_0^3 (3-x) \cos \frac{n\pi x}{3} dx \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left\{ \frac{1}{3} \left(\frac{3x}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{3} + \frac{9}{n^2 \pi^2} \cos \frac{n\pi x}{3} \right) \Big|_{-3}^0 + \left[\frac{3}{n\pi} (3-x) \sin \frac{n\pi x}{3} - \frac{9}{n^2 \pi^2} \cos \frac{n\pi x}{3} \right] \Big|_0^3 \right\} = \\ &= \frac{4}{n^2 \pi^2} [1 - (-1)^n] = \begin{cases} 0, & n = 2k, \\ \frac{8}{(2k-1)^2 \pi^2}, & n = 2k-1, \quad (k = 1, 2, \dots), \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{3} \int_{-3}^3 f(x) \sin \frac{n\pi x}{3} dx = \frac{1}{3} \left[\int_{-3}^0 \frac{x}{3} \sin \frac{n\pi x}{3} dx + \int_0^3 (3-x) \sin \frac{n\pi x}{3} dx \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[\frac{1}{3} \left(-\frac{3x}{n\pi} \cos \frac{n\pi x}{3} + \frac{9}{n^2 \pi^2} \sin \frac{n\pi x}{3} \right) \Big|_{-3}^0 + \left(-\frac{3}{n\pi} (3-x) \cos \frac{n\pi x}{3} - \frac{9}{n^2 \pi^2} \sin \frac{n\pi x}{3} \right) \Big|_0^3 \right] = \\ &= \frac{1}{n\pi} [3 - (-1)^n] = \begin{cases} \frac{1}{k\pi}, & n = 2k, \\ \frac{4}{(2k-1)\pi}, & n = 2k-1, \quad (k = 1, 2, \dots). \end{cases} \end{aligned}$$

Отже, враховуючи тільки ненульові члени ряду, одержуємо, що задана функція в точках її неперервності подається у вигляді

$$f(x) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8}{(2k-1)^2 \pi^2} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{3} + \frac{4}{(2k-1)\pi} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{3} + \frac{1}{k\pi} \sin \frac{2k\pi x}{3}.$$

В точці розриву $x = 0$ значення суми ряду

$$S(0) = \frac{1}{2} \left[\lim_{x \rightarrow 0-0} f(x) + \lim_{x \rightarrow 0+0} f(x) \right] = \frac{1}{2} [0 + 3] = \frac{3}{2},$$

а в межових точках $x = \pm 3$ воно є

$$S(\pm 3) = \frac{1}{2} \left[\lim_{x \rightarrow -3+0} f(x) + \lim_{x \rightarrow 3-0} f(x) \right] = \frac{1}{2} [-1 + 0] = -\frac{1}{2}.$$

Приклад 28. Знайти зображення функції $f(t) = te^{3t}\eta(t-2)$.

Розв'язання. Розглянемо два способи.

Перший спосіб. Перетворимо тотожно задану функцію:

$$f(t) = te^{3t}\eta(t-2) = te^{3(t-2+2)}\eta(t-2) = e^6 te^{3(t-2)}\eta(t-2).$$

Оскільки $e^{3t} \rightarrow \frac{1}{p-3}$, то за теоремою запізнювання $e^{3(t-2)}\eta(t-2) \rightarrow \frac{1}{p-3}e^{-2p}$,

а за теоремою про диференціювання зображення

$$\begin{aligned} te^{3(t-2)}\eta(t-2) &\rightarrow -\left(\frac{1}{p-3}e^{-2p}\right)' = -\left[-\frac{1}{(p-3)^2}e^{-2p} - 2\frac{1}{p-3}e^{-2p}\right] = \\ &= e^{-2p}\left[\frac{1}{(p-3)^2} + \frac{2}{p-3}\right]. \end{aligned}$$

З урахуванням лінійності перетворення Лапласа

остаточно маємо $F(p) = e^{-2p+6}\left[\frac{1}{(p-3)^2} + \frac{2}{p-3}\right]$.

Другий спосіб. Перетворимо тотожно задану функцію дещо по іншому:

$$\begin{aligned} f(t) &= te^{3t}\eta(t-2) = (t-2+2)e^{3t}\eta(t-2) = e^{3t}(t-2)\eta(t-2) + 2e^{3t}\eta(t-2) = \\ &= e^{3t}[(t-2)\eta(t-2) + 2\eta(t-2)]. \end{aligned}$$

Оскільки $t \rightarrow \frac{1}{p^2}$, $1 \rightarrow \frac{1}{p}$, то за теоремою запізнювання

$$(t-2)\eta(t-2) \rightarrow \frac{1}{p^2}e^{-2p}, \quad \eta(t-2) \rightarrow \frac{1}{p}e^{-2p}.$$

Тоді за теоремою зміщення з

урахуванням лінійності перетворення Лапласа одержуємо

$$F(p) = \frac{1}{(p-3)^2}e^{-2(p-3)} + \frac{2}{p-3}e^{-2(p-3)}.$$

Приклад 29. Знайти зображення функції $f(t) = \frac{e^{-2t} \sin^2 3t}{t}$.

Розв'язання. Оскільки $\sin^2 3t = \frac{1 - \cos 6t}{2}$, то за теоремою зміщення та

властивістю лінійності перетворення Лапласа маємо

$$e^{-2t} \sin^2 3t \rightarrow \frac{1}{2} \left[\frac{1}{p+2} - \frac{p+2}{(p+2)^2 + 36} \right].$$

Тоді за теоремою про інтегрування зображення

$$\begin{aligned} f(t) = \frac{e^{-2t} \sin^2 3t}{t} &\rightarrow \int_p^{+\infty} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{q+2} - \frac{q+2}{(q+2)^2 + 36} \right] dq = \frac{1}{2} \lim_{B \rightarrow +\infty} \left[\ln|q+2| - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \ln[(q+2)^2 + 36] \right] \Big|_p^B = \frac{1}{2} \lim_{B \rightarrow +\infty} \ln \frac{B+2}{\sqrt{(B+2)^2 + 36}} - \frac{1}{2} \ln \frac{p+2}{\sqrt{(p+2)^2 + 36}} = \\ &= \frac{1}{4} \ln \frac{(p+2)^2 + 36}{(p+2)^2} \quad (\text{тут враховано, що } \lim_{B \rightarrow +\infty} \ln \frac{B+2}{\sqrt{(B+2)^2 + 36}} = \\ &= \ln \lim_{B \rightarrow +\infty} \frac{B+2}{\sqrt{(B+2)^2 + 36}} = \ln 1 = 0). \end{aligned}$$

Приклад 30. Знайти зображення функції $f(t) = \int_0^t \tau^3 e^\tau d\tau$.

Розв'язання.

Оскільки $t^3 \rightarrow \frac{3!}{p^4}$, то за теоремою зміщення $t^3 e^t \rightarrow \frac{3!}{(p-1)^4}$ (інакше:

оскільки $e^t \rightarrow \frac{1}{p-1}$, то за теоремою про диференціювання зображення

$t^3 e^t \rightarrow (-1)^3 \left(\frac{1}{p-1} \right)''' = \frac{6}{(p-1)^4}$). Тоді за теоремою про інтегрування оригіналу

$$f(t) = \int_0^t \tau^3 e^\tau d\tau \rightarrow \frac{6}{p(p-1)^4}.$$

Приклад 31. Знайти зображення імпульсної функції $f(t) = \begin{cases} 0, & t < 3, \\ h, & 3 \leq t < 5, \\ 0, & t \geq 5. \end{cases}$

Розв'язання. Графік функції наведений на рис. 8.

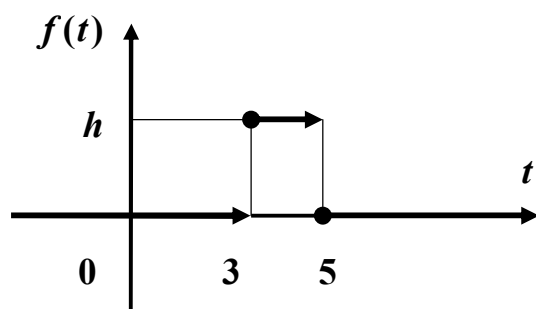


Рис. 8

Кусково-неперервна функція $f(t) = \begin{cases} 0, & t < a, \quad t > b, \\ \varphi(t) \neq 0 & \forall t \in (a, b) \end{cases}$ (рис. 9)

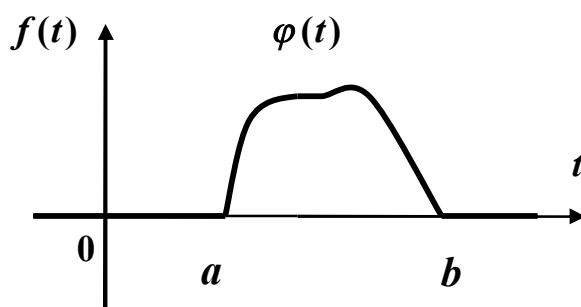


Рис. 9

подається формулою

$$f(t) = \varphi(t) \cdot [\eta(t-a) - \eta(t-b)],$$

отже, задана функція може бути зображена у вигляді

$$f(t) = h \cdot \eta(t-3) - h \cdot \eta(t-5) = h[\eta(t-3) - \eta(t-5)].$$

Тоді за властивістю лінійності і теоремою запізнювання маємо

$$f(t) \rightarrow h \left(e^{-3t} \frac{1}{p} - e^{-5t} \frac{1}{p} \right) = h \frac{e^{-3t}}{p} (1 - e^{-2t}).$$

Приклад 32. Знайти оригінал, що відповідає зображенню

$$F(p) = \frac{p+1}{(p-1)(p+3)}.$$

Розв'язання. Розкладемо дріб $\frac{p+1}{(p-1)(p+3)}$ у суму найпростіших дробів:

$$F(p) = \frac{p+1}{(p-1)(p+3)} = \frac{1}{2(p-1)} + \frac{1}{2(p+3)}.$$

За таблицею оригіналів і зображень з урахуванням лінійності знаходимо:

$$f(t) = \frac{1}{2}e^t + \frac{1}{2}e^{-3t}.$$

Приклад 33. Відновити оригінал за зображенням

$$F(p) = \frac{1}{(p-1)(p+1)^3}.$$

Розв'язання. Розкладемо дріб $\frac{1}{(p-1)(p+1)^3}$ у суму найпростіших дробів:

$$F(p) = \frac{1}{(p-1)(p+1)^3} = -\frac{1}{2(p+1)^3} - \frac{1}{4(p+1)^2} - \frac{1}{8(p+1)} + \frac{1}{8(p-1)}.$$

За таблицею оригіналів і зображень з урахуванням лінійності знаходимо:

$$f(t) = -\frac{1}{4}t^2e^{-t} - \frac{1}{4}te^{-t} - \frac{1}{8}e^{-t} + \frac{1}{8}e^t = \frac{1}{8}[e^t - e^{-t}(2t^2 + 2t + 1)].$$

Приклад 34. Знайти оригінал, що відповідає зображенню

$$F(p) = \frac{pe^{-3p}}{(p^2-4)(p^2+4p+8)}.$$

Розв'язання. Розкладемо дріб $\frac{p}{(p^2-4)(p^2+4p+8)}$ у суму найпростіших

дробів:

$$\frac{p}{(p^2-4)(p^2+4p+8)} = \frac{1}{40} \cdot \frac{1}{p-2} + \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{p+2} - \frac{3}{20} \cdot \frac{p+\frac{8}{3}}{p^2+4p+8}.$$

За таблицею основних зображень (додаток 1) і за теоремою зміщення з урахуванням лінійності маємо

$$\begin{aligned} \frac{1}{40} \cdot \frac{1}{p-2} + \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{p+2} &\leftarrow \frac{1}{40}e^{2t} + \frac{1}{8}e^{-2t}, \\ -\frac{3}{20} \cdot \frac{p+\frac{8}{3}}{p^2+4p+8} &= -\frac{3}{20} \cdot \frac{p+2+\frac{2}{3}}{p^2+4p+8} \leftarrow -\frac{3}{20} \cdot e^{-2t} \cos 2t - \frac{1}{20} \cdot e^{-2t} \sin 2t, \end{aligned}$$

отже,

$$\frac{p}{(p^2 - 4)(p^2 + 4p + 8)} \leftarrow \frac{1}{40} e^{2t} + \frac{1}{8} e^{-2t} - \frac{3}{20} \cdot e^{-2t} \cos 2t - \frac{1}{20} \cdot e^{-2t} \sin 2t.$$

Тоді за теоремою запізнювання остаточно маємо

$$f(t) = \left[\frac{1}{40} e^{2t-6} + \frac{1}{8} e^{-2t+6} - \frac{1}{20} \cdot e^{-2t+6} [3 \cos(2t-6) + \sin(2t-6)] \right] \cdot \eta(t-3).$$

Приклад 35. Знайти розв'язок диференціального рівняння

$$x'' + 4x' + 4x = e^{-2t} (\cos t + 2 \sin t),$$

що задовольняє початковим умовам $x(0) = -1$, $x'(0) = 1$.

Розв'язання. Нехай $x(t) \rightarrow X(p)$. Тоді за теоремою про диференціювання оригіналу з урахуванням початкових умов маємо

$$x'(t) \rightarrow pX(p) + 1, \quad x''(t) \rightarrow p^2 X(p) + p - 1.$$

За таблицею оригіналів і зображень (додаток 1) з урахуванням лінійності знаходимо

$$\cos t + 2 \sin t \rightarrow \frac{p}{p^2 + 1} + 2 \cdot \frac{1}{p^2 + 1} = \frac{p + 2}{p^2 + 1}.$$

Тоді за теоремою зміщення

$$e^{-2t} (\cos t + 2 \sin t) \rightarrow \frac{p + 4}{(p + 2)^2 + 1}.$$

Підставивши усі отримані вирази до заданого рівняння, отримаємо операторне рівняння у вигляді

$$p^2 X(p) + p - 1 + 4pX(p) + 4 + 4X(p) = \frac{p + 4}{(p + 2)^2 + 1}$$

або, після перетворень,

$$(p^2 + 4p + 4)X(p) + p + 3 = \frac{p + 4}{(p + 2)^2 + 1}.$$

Знайдемо звідси зображення розв'язку:

$$X(p) = -\frac{p^3 + 7p^2 + 16p + 11}{[(p+2)^2 + 1](p+2)^2}.$$

Розклавши дріб у суму найпростіших дробів, отримаємо:

$$X(p) = -\frac{p+4}{(p+2)^2+1} + \frac{1}{(p+2)^2} = -\frac{p+2}{(p+2)^2+1} - 2 \cdot \frac{1}{(p+2)^2+1} + \frac{1}{(p+2)^2}.$$

Оскільки $\frac{p}{p^2+1} \leftarrow \cos t$, $\frac{1}{p^2+1} \leftarrow \sin t$, $\frac{1}{p^2} \leftarrow t$, то за теоремою

зміщення і властивістю лінійності остаточно маємо розв'язок задачі Коші у вигляді

$$\tilde{x}(t) = e^{-2t}(t - \cos t - 2 \sin t).$$

Приклад 36. Знайти розв'язок задачі Коші $x'' - 2x' + x = f(t)$,

$$x(0) = 0, x'(0) = 0, \text{ де } f(t) = \begin{cases} 0, & t < 1, \\ -1, & 1 < t < 3, \\ 2, & t > 3. \end{cases}$$

Розв'язання. Права частина рівняння є кусково-неперервною функцією. За формулою $f(t) = \varphi(t) \cdot [\eta(t-a) - \eta(t-b)]$ зобразимо її у вигляді

$$f(t) = -[\eta(t-1) - \eta(t-3)] + 2\eta(t-3)$$

або

$$f(t) = -\eta(t-1) + 3\eta(t-3).$$

Нехай $x(t) \rightarrow X(p)$. Тоді за теоремою про диференціювання оригіналу маємо $x'(t) \rightarrow pX(p)$, $x''(t) \rightarrow p^2X(p)$. За таблицею оригіналів і зображень і теоремою лінійності

$$f(t) = -\eta(t-1) + 3\eta(t-3) \rightarrow -\frac{e^{-p}}{p} + 3 \cdot \frac{e^{-3p}}{p}.$$

Підставивши усі отримані вирази до заданого рівняння, отримаємо операторне рівняння у вигляді

$$(p^2 - 2p + 1)X(p) = \frac{3e^{-3p} - e^{-p}}{p},$$

звідки зображення розв'язку

$$X(p) = \frac{3e^{-3p} - e^{-p}}{p(p-1)^2}.$$

Розклавши дріб $\frac{1}{p(p-1)^2}$ у суму найпростіших дробів, отримаємо:

$$\frac{1}{p(p-1)^2} = \frac{1}{p} - \frac{1}{p-1} + \frac{1}{(p-1)^2}.$$

Оскільки $\frac{1}{p} \leftarrow 1$, $\frac{1}{p^2} \leftarrow t$, то за теоремою зміщення з урахуванням лінійності

$$\frac{1}{p(p-1)^2} \leftarrow 1 - e^t + te^t.$$

Тоді за теоремою запізнювання з урахуванням лінійності остаточно маємо розв'язок задачі Коші у вигляді

$$\tilde{x}(t) = 3\left(1 - e^{t-3} + (t-3)e^{t-3}\right)\eta(t-3) - \left(1 - e^{t-1} + (t-1)e^{t-1}\right)\eta(t-1).$$

Приклад 37. Знайти розв'язок задачі Коші

$$\begin{cases} \dot{x} - x - 2y + 9t = 0 \\ \dot{y} - 2x - y = 4e^t \end{cases}, \quad x(0) = 1, y(0) = 2.$$

Розв'язання. Позначимо $x(t) \rightarrow X(p)$, $y(t) \rightarrow Y(p)$. Оскільки $t \rightarrow \frac{1}{p^2}$,

$e^t \rightarrow \frac{1}{p-1}$, то за теоремою про диференціювання оригіналу і властивістю

лінійності отримуємо наступну систему операторних рівнянь відносно зображень $X(p)$ й $Y(p)$:

$$\begin{cases} (p-1)X(p) - 2Y(p) = 1 - \frac{9}{p^2}, \\ -2X(p) + (p-1)Y(p) = 2 + \frac{4}{p-1}. \end{cases}$$

Знайдемо $X(p)$ й $Y(p)$ за формулами Крамера: $X(p) = \frac{\Delta_X}{\Delta}$, $Y(p) = \frac{\Delta_Y}{\Delta}$,

$$\text{де } \Delta = \begin{vmatrix} p-1 & -2 \\ -2 & p-1 \end{vmatrix} = p^2 - 2p - 3 = (p-3)(p+1),$$

$$\Delta_X = \begin{vmatrix} \frac{p^2-9}{p^2} & -2 \\ \frac{2p+2}{p-1} & p-1 \end{vmatrix} = \frac{p^4 + 2p^3 - 4p^2 + 18p - 9}{p^2(p-1)},$$

$$\Delta_Y = \begin{vmatrix} p-1 & \frac{p^2-9}{p^2} \\ -2 & \frac{2p+2}{p-1} \end{vmatrix} = \frac{2p^3 + 4p^2 - 18}{p^2}.$$

$$\text{Отже, } X(p) = \frac{p^4 + 2p^3 - 4p^2 + 18p - 9}{p^2(p-1)(p-3)(p+1)}, \quad Y(p) = \frac{2p^3 + 4p^2 - 18}{p^2(p-3)(p+1)}.$$

Розкладемо зображення у суму найпростіших дробів:

$$X(p) = \frac{5}{p} - \frac{3}{p^2} - \frac{2}{p-1} + \frac{2}{p-3} - \frac{4}{p+1}, \quad Y(p) = -\frac{4}{p} + \frac{6}{p^2} + \frac{2}{p-3} + \frac{4}{p+1}.$$

Відновимо оригінали, застосувавши таблицю і властивість лінійності.

Отже, розв'язок задачі має вигляд:

$$\tilde{x}(t) = 5 - 3t - 2e^t + 2e^{3t} - 4e^{-t}, \quad \tilde{y}(t) = -4 + 6t + 2e^{3t} + 4e^{-t}.$$

ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Завдання 1. Обчислити подвійні інтеграли.

$$1. \text{ а) } \iint_D xy dx dy, \quad D: y = x, y = 2, y = 0; \quad \text{б) } \iint_D \rho \sin \varphi \, d\rho d\varphi, \quad \text{де } D - \text{ круговий}$$

сектор $\rho = a, \quad \varphi = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi = \pi$.

$$2. \text{ а) } \iint_D (x-y) dx dy, \quad D: y = x, x + y = 2, y = 0; \quad \text{б) } \iint_D \rho^2 \, d\rho d\varphi, \quad \text{де область } D -$$

кільце $\rho = a, \quad \rho = 2a$.

3. а) $\iint_D (2x - y) dx dy$, $D: x = 1, x = 2, y = x, y = x^2$; б) $\iint_D \rho^2 d\rho d\varphi$, якщо область D обмежена кривою $\rho = a \sin 2\varphi$.

4. а) $\iint_D (3x + y) dx dy$, $D: y = 2x, x + y = 3, x = 0$; б) $\iint_D \rho d\rho d\varphi$, якщо область D обмежена кардіоїдою $\rho = a(1 + \cos \varphi)$ і колом $\rho = a$.

5. а) $\iint_D x^2 y dx dy$, $D: y = x^2, x + y = 2$; б) $\iint_D \rho^3 d\rho d\varphi$, якщо область D обмежена кривою $\rho^2 = a^2 \cos 2\varphi$ і полярною віссю, за умови, що $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

6. а) $\iint_D y dx dy$, $D: y = x, y = 5x, x = 1$; б) $\iint_D \rho^2 \sin \varphi d\rho d\varphi$, якщо область D обмежена лініями $\rho = R$ і $\rho = 2R \sin \varphi$.

7. а) $\iint_D \frac{x^2}{y^2} dx dy$, $D: x = 2, y = x, xy = 1$; б) $\iint_D \rho^2 d\rho d\varphi$, якщо область D – півколо $\rho \leq 2a \cos \varphi$, де $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

8. а) $\iint_D (x - y) dx dy$, $D: y = 2 - x^2, y = 2x - 1$; б) $\iint_D \rho^2 \sin^2 \varphi d\rho d\varphi$, якщо область D обмежена лініями $\rho = 3 \cos \varphi$, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ і $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

9. а) $\iint_D xy dx dy$, $D: y = x^2, y = 2x$; б) $\iint_D \rho^2 d\rho d\varphi$ якщо область D обмежена першим витком спіралі $\rho = a\varphi$ і полярною віссю.

10. а) $\iint_D xy dx dy$, $D: y = x, y = 0, x = 5$; б) $\iint_D \rho^2 d\rho d\varphi$ якщо область D обмежена кардіоїдою $\rho = a(1 + \cos \varphi)$ і полярною віссю за умови, що $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

Завдання 2. Обчислити криволінійні інтеграли.

1. а) $\int_L \frac{dl}{\sqrt{x^2 + y^2 + 4}}$, де L – відрізок прямої між точками $O(0;0)$ й $A(1;2)$;
 б) $\int_{AB} xdy - ydx$, де AB – дуга параболи $y = 4 - x^2$ між точками $A(-2;0)$ й $B(0;4)$.
2. а) $\int_L \frac{dl}{\sqrt{8 - x^2 - y^2}}$, де L – відрізок прямої між точками $O(0;0)$ й $B(2;2)$;
 б) $\int_{AB} (x^2 - 2xy)dx + (y^2 - 2xy)dy$, де AB – дуга параболи $y = x^2$ між точками $A(-1;1)$ й $B(1;1)$.
3. а) $\int_L (4\sqrt[3]{x} - 3\sqrt{y})dl$, де L – відрізок прямої між точками $A(-1;0)$ й $B(0;1)$;
 б) $\int_{OA} (x^2 + y^2)dx + 2xydy$, де OA – дуга кубічної параболи $y = x^3$ між точками $O(0;0)$ й $A(1;1)$.
4. а) $\int_L \frac{dl}{\sqrt{5(2x + y)}}$, де L – відрізок прямої між точками $A(0;4)$ й $B(4;0)$;
 б) $\oint_L (x + 2y)dx + (x - y)dy$, де L – коло $x = 2\cos t$, $y = 2\sin t$, що проходиться за ходом годинникової стрілки.
5. а) $\int_L \frac{ydl}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, де L – дуга кардіоїди $\rho = 2(1 + \cos \varphi)$ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$);
 б) $\int_{OBA} 2xydx - x^2dy$, де OBA – ламана: $O(0;0)$, $A(2;1)$, $B(2;0)$.
6. а) $\int_L ydl$, де L – дуга астроїди $x = \cos^3 t$, $y = \sin^3 t$ між точками $A(1;0)$ й $B(0;1)$;

б) $\int_{AB} (x^2 + y^2) dx + xy dy$, де L – відрізок прямої між точками $A(1;1)$ й $B(3;4)$.

7. а) $\int_L y dl$, де L – дуга параболи $y^2 = \frac{2}{3}x$ між точками $O(0;0)$ і $B\left(\frac{35}{6}; \frac{\sqrt{35}}{3}\right)$;

б) $\int_{AB} \cos y dx - \sin x dy$, де AB – відрізок прямої між точками $A(2\pi; -2\pi)$ й $B(-2\pi; 2\pi)$.

8. а) $\oint_{OABCO} xy dl$, де $OABCO$ – контур прямокутника з вершинами $O(0;0)$, $A(4;0)$, $B(4;2)$, $C(0;2)$;

б) $\int_{AB} \frac{y dx + x dy}{x^2 + y^2}$, де AB – відрізок прямої між точками $A(1;2)$ й $B(3;6)$.

9. а) $\oint_{ABOA} (x + y) dl$, де $ABOA$ – контур трикутника з вершинами $A(1;0)$, $B(0;1)$, $O(0;0)$;

б) $\int_{ABC} (x^2 + y^2) dx + (x + y^2) dy$, де ABC – ламана: $A(1;2)$, $B(3;2)$, $C(3;5)$.

10. а) $\int_L \sqrt{2y} dl$, де L – перша арка циклоїди $x = 2(t - \sin t)$, $y = 2(1 - \cos t)$ ($0 \leq t \leq 2\pi$);

б) $\int_{AB} xy dx + (y - x) dy$, де AB – дуга кубічної параболи $y = x^3$ між точками $A(0;0)$ й $B(1;1)$.

Завдання 3. Знайти загальний або частинний розв'язок рівнянь.

1. а) $e^{x+3y} dy = x dx$;

б) $y - xy' = x \sec \frac{y}{x}$;

в) $(x^2 + 1)y' + 4xy = 3, y(0) = 0$.

2. a) $e^{-x^2} dy + x \sec^2 y dx = 0$;
 B) $y' + y \operatorname{tg} x = \sec x, y(0) = 0$.
3. a) $y' = (2x - 1) \operatorname{ctg} y$;
 B) $(1 - x)(y' + y) = e^{-x}, y(0) = 0$.
4. a) $\sec^2 x \operatorname{tg} y dy = -\sec^2 y \operatorname{tg} x dx$;
 B) $xy' - 2y = 2x^4, y(1) = 0$.
5. a) $(1 + e^x) y dy - e^y dx = 0$;
 B) $y' = 2x(x^2 + y), y(0) = 0$.
6. a) $x(y^2 + 3) dx = e^x y dy$;
 B) $y' - y = e^x, y(0) = 1$.
7. a) $y' = (2x + 1) \operatorname{tg} y$;
 B) $y' \sin x - y \cos x = 1, y\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$.
8. a) $\sin y \cos x dy - \cos y \sin x dx = 0$;
 B) $xy' + y + xe^{-x^2} = 0, y(1) = \frac{1}{2e}$.
9. a) $(1 + e^x) y dy - e^y dx = 0$;
 B) $x^2 y' + xy + 1 = 0, y(1) = 0$.
10. a) $e^x \sin y dx + \operatorname{tg} y dy = 0$;
 B) $(1 - x^2) y' + xy = 1, y(0) = 1$.
- б) $(y^2 - 3x^2) dy + 2xy dx = 0$;
- б) $(x + 2y) dx - x dy = 0$;
- б) $(x - y) dx + (x + y) dy = 0$;
- б) $(y^2 - 2xy) dx + x^2 dy = 0$;
- б) $y^2 + x^2 y' = xyy'$;
- б) $xy' - y = x \operatorname{tg} \frac{y}{x}$;
- б) $xy' = y - xe^{\frac{y}{x}}$;
- б) $xy' + y(\ln y - \ln x - 1) = 0$;
- б) $(2\sqrt{xy} - y) dx + x dy = 0$;

Завдання 4. Розв'язати задачу Коші.

1. а) $y'' = \sin 4x = x, y(0) = 1, y'(0) = \frac{3}{4}$; б) $y'' + 3y' + 2y = 0, y(0) = 1, y'(0) = 1$.

2. а) $y'' = \frac{1}{x}, y(1) = \frac{1}{4}, y'(1) = 0$; б) $y'' + 9y = 0, y(0) = 1, y'(0) = 2$,

3. а) $y'' = \frac{1}{\cos^2 x}, y(0) = 1, y'(0) = 0,6$; б) $y'' - 4y' = 0, y(0) = -1, y'(0) = 4$.

4. а) $y'' = \frac{6}{x^3}, y(1) = 0, y'(1) = 5$; б) $y'' - 12y' + 36y = 0, y(0) = 2, y'(0) = 8$.

5. а) $y'' = 4\cos 2x, y(0) = 1, y'(0) = 3$; б) $y'' + 9y = 0, y(0) = 5, y'(0) = 3$.

6. а) $y'' = \frac{1}{1+x^2}, y(0) = 1, y'(0) = 3$; б) $y'' - 4y = 0, y(0) = 5, y'(0) = -1$

7. а) $xy'' = 2, y(1) = \frac{1}{2}, y'(1) = 0$; б) $y'' + y' - 6y = 0, y(0) = -1, y'(0) = 1$.

8. а) $y'' = e^{-2x}, y(0) = \frac{5}{4}, y'(0) = \frac{1}{4}$; б) $y'' + 3y' = 0, y(0) = 0, y'(0) = 5$.

9. а) $y'' = \cos^2 x, y(0) = 1, y'(0) = -\frac{1}{8}$; б) $y'' - 5y' + 4y = 0, y(0) = -2, y'(0) = 2$.

10. а) $y'' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}, y(0) = 2, y'(0) = 3$; б) $y'' - 6y' + 8y = 0, y(0) = 3, y'(0) = -1$.

Завдання 5. Розв'язати рівняння.

1. а) $y'' - 8y' + 17y = 10e^{2x}$; б) $y'' - 2y' + y = -12\cos 2x - 9\sin 2x$.

2. а) $y'' - 2y' - 8y = 12\sin 2x$; б) $y'' - 6y' + 9y = 9x^2 - 39x + 65$.

3. а) $y'' - 3y' + 2y = 3\cos x$; б) $y'' + 2y' + 2y = 2x^2 + 8x + 6$.

4. а) $y'' + y' - 6y = 6xe^{3x}$; б) $y'' - 6y' + 25y = 9\sin 4x - 24\cos 4x$.

5. а) $y'' + 2y' - 3y = (6x - 4)e^x$; б) $y'' - 14y' + 49y = 25\sin x$.

6. а) $y'' + 4y' + 29y = 26e^{-x}$; б) $y'' + 5y' + 6y = 52\sin 2x$.

7. а) $y'' + 2y' + y = 22x - 4$; б) $y'' - 4y' + 20y = 16xe^{2x}$.

8. а) $y'' + 6y' + 10y = 74e^{3x}$; б) $y'' - 3y' + 2y = -7\cos x - \sin x$.

9. а) $y'' - 2y' + y = 4e^x$; б) $y'' + 16y = 22 - 12x + 48x^2 - 32x^3$.
 10. а) $y'' - 8y' + 20y = 16\sin 2x$; б) $y'' - y = (14 - 16x)e^{-x}$.

Завдання 6. Розв'язати систему рівнянь.

1.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 2x + y \\ \frac{dy}{dt} = 3x + 4y \end{cases}$$

2.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x - y \\ \frac{dy}{dt} = -4x + y \end{cases}$$

3.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -x + 8y \\ \frac{dy}{dt} = x + y \end{cases}$$

4.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 5x + 8y \\ \frac{dy}{dt} = 3x + 3y \end{cases}$$

5.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x - y \\ \frac{dy}{dt} = -4x + 4y \end{cases}$$

6.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 6x - y \\ \frac{dy}{dt} = 3x + 2y \end{cases}$$

7.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -2x + y \\ \frac{dy}{dt} = -3x + 2y \end{cases}$$

8.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 2x + y \\ \frac{dy}{dt} = -6x - 3y \end{cases}$$

9.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 3x - 2y \\ \frac{dy}{dt} = -3x + 4y \end{cases}$$

10.
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -x - 2y \\ \frac{dy}{dt} = 3x + 4y \end{cases}$$

Завдання 7. Встановити збіжність або довести розбіжність числових рядів.

1. а) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n (n+2)!}{n^5}$;

б) $\sum_{n=1}^{\infty} 10^n \left(\frac{n+1}{n}\right)^n$;

в) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{(n+1)^4}$.

2. а) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{7^n - 1}{5^n (n+1)!}$;

б) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{5n-1}{5n}\right)^{n^2}$;

в) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}}$.

3. а) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{7}{8}\right)^n \left(\frac{1}{n}\right)^7$;

б) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{2n+1}\right)^n$;

в) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1}{2n^2+1}$.

4. а) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(n+1)}{3^n}$;

б) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\ln(n+2))^n}$;

в) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt[4]{(4n+5)^3}}$.

$$5. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 \cdot (2n-1)!}{3^n};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \left(\arcsin \frac{1}{2^n} \right)^{3n};$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n}{1+n^3}.$$

$$6. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cdot 3^n}{5 \cdot 7 \cdot 9 \cdot \dots \cdot (2n+3)};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n^2 + 5n + 8}{3n^2 - 2} \right)^n;$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt[4]{(7n-5)^5}}.$$

$$7. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3}{(n+1)!};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{5^n} \right)^n;$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n+7}{n^2+49} \right)^2;$$

$$8. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n (6n-5)}{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (n+1)};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} 2^n \left(\frac{n}{2n+1} \right)^{n^2};$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3n+2}.$$

$$9. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n+2)!}{\sqrt{n} \cdot 5^n};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi}{5^n} \right)^{3n};$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{5n(6n+3)}.$$

$$10. \text{ a) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3n(n+1)}{5^n};$$

$$\text{б) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\ln(n+1))^{2n}};$$

$$\text{B) } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{n}+2}{n^3 \sqrt{n}+3}.$$

Завдання 8. Встановити характер збіжності або довести розбіжність рядів.

$$1. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{(n+1)3^n}.$$

$$2. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{2n+1}}.$$

$$3. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{n^2+1}.$$

$$4. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{3^n}{(n+1)!}.$$

$$5. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{1}{n2^n}.$$

$$6. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{\sqrt{n}}.$$

$$7. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2n-1}{3^n}.$$

$$8. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n^2+1}{n^3}.$$

$$9. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n \sqrt[3]{n+1}}.$$

$$10. \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{n^3+1}.$$

Завдання 9. Знайти область збіжності степеневому ряду.

1. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x-4)^{2n+1}}{2n-1}$.
2. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{nx^{n-1}}{2^{n-1}3^n}$.
3. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n x^n}{n^2+1}$.
4. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{3n}}{8^n(n^2+1)}$.
5. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n x^n}{(2n+1)^2 \sqrt{3^n}}$.
6. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5^n x^n}{6^n \sqrt[3]{n+1}}$.
7. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x-1)^n}{2^n(n+3)}$.
8. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(3n-2)(x-3)^n}{2^{n+1}(n+1)^2}$.
9. $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(x-2)^{2n}}{\sqrt{n+3}}$.
10. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n x^n}{\sqrt{2n+1}}$.

Завдання 10. Обчислити визначений інтеграл з точністю **0,001**, використовуючи розвинення підінтегральної функції в степеневий ряд.

1. $\int_0^{0.25} \ln(1+\sqrt{x}) dx$.
2. $\int_0^1 \arctg\left(\frac{x^2}{2}\right) dx$.
3. $\int_0^{0.2} \sqrt{x} \cdot \sin \sqrt{x} dx$.
4. $\int_0^{0.5} \frac{\arctg x}{x} dx$.
5. $\int_0^{0.25} \sqrt{x} \cdot \cos x dx$.
6. $\int_0^{0.5} \ln(1+x^3) dx$.
7. $\int_0^1 x^2 \cdot \sin x dx$.
8. $\int_0^1 e^{-\frac{x^2}{2}} dx$.
9. $\int_0^{0.5} \sqrt{x^3+1} \cdot x dx$.
10. $\int_0^{0.5} \frac{1}{x^5+1} dx$.

Завдання 11. Знайти три перші ненульові члени розвинення в степеневий ряд розв'язку задачі Коші.

1. $y' = xy + e^y, y(0) = 0$.
2. $y' = x^2 y^2 + 1, y(0) = 1$.
3. $y' = x^2 - y^2, y(0) = 0,5$.
4. $y' = x^3 + y^2, y(0) = 0,5$.
5. $y' = x + y^2, y(0) = -1$.
6. $y' = x + x^2 + y^2, y(0) = 1$.
7. $y' = 2 \cos x - xy^2, y(0) = 1$.
8. $y' = e^x - y^2, y(0) = 0$.
9. $y' = x + y + y^2, y(0) = 1$.
10. $y' = x^2 + y^2, y(0) = 1$.

Завдання 12. Розвинути в ряд Фур'є функції.

1. а) $f(x) = 5x - \pi$, $x \in (-\pi; \pi)$, $T = 2\pi$;

б) $f(x) = \begin{cases} \cos \frac{\pi x}{2}, & x \in (-2; -1] \\ 2, & x \in (-1; 0) \end{cases}$ на інтервалі $(-2; 0)$ за синусами.

2. а) $f(x) = 3\pi - x$, $x \in (-\pi; \pi)$, $T = 2\pi$;

б) $f(x) = \begin{cases} 1 - 2\pi, & x \in (0; 2] \\ -3, & x \in (2; 5) \end{cases}$ на інтервалі $(0; 5)$ за косинусами.

3. а) $f(x) = 1 - \pi x$, $x \in (-4; 4)$, $T = 8$;

б) $f(x) = \begin{cases} 5\pi, & x \in \left(-\pi; -\frac{\pi}{4}\right] \\ \pi - x, & x \in \left(-\frac{\pi}{4}; 0\right) \end{cases}$ на інтервалі $(-\pi; 0)$ за синусами.

4. а) $f(x) = \pi - 5x$, $x \in \left(-\frac{3\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}\right)$, $T = 3\pi$;

б) $f(x) = \begin{cases} \sin \frac{3x}{2}, & x \in \left(0; \frac{\pi}{3}\right] \\ -2, & x \in \left(\frac{\pi}{3}; \pi\right) \end{cases}$ на інтервалі $(0; \pi)$ за косинусами.

5. а) $f(x) = x - 2\pi$, $x \in (-2\pi; 2\pi)$, $T = 4\pi$;

б) $f(x) = \begin{cases} 1 - 2x, & x \in (-5; -3] \\ 2\pi, & x \in (-3; 0) \end{cases}$ на інтервалі $(-5; 0)$ за синусами.

6. а) $f(x) = 2x - \pi$, $x \in (-2; 2)$, $T = 4$;

$$\text{б) } f(x) = \begin{cases} -3, & x \in \left(0; \frac{\pi}{4}\right] \\ 2\pi, & x \in \left(\frac{\pi}{4}; \pi\right) \end{cases} \text{ на інтервалі } (0; \pi) \text{ за косинусами.}$$

$$7. \text{ а) } f(x) = 3\pi - x, \quad x \in (-\pi; \pi), \quad T = 2\pi;$$

$$\text{б) } f(x) = \begin{cases} 3x, & x \in (0; 1] \\ 2, & x \in (1; 2) \end{cases} \text{ на інтервалі } (0; 2) \text{ за синусами.}$$

$$8. \text{ а) } f(x) = \cos \frac{4x}{3}, \quad x \in (-\pi; \pi), \quad T = 2\pi;$$

$$\text{б) } f(x) = \begin{cases} 2 - 3x, & x \in (-4; -2] \\ 0, & x \in (-2; 0) \end{cases} \text{ на інтервалі } (-4; 0) \text{ за косинусами.}$$

$$9. \text{ а) } f(x) = \sin \frac{\pi x}{3}, \quad x \in (-3; 3), \quad T = 6;$$

$$\text{б) } f(x) = \begin{cases} 2x, & x \in (-2\pi; -\pi] \\ 1, & x \in (-\pi; 0) \end{cases} \text{ на інтервалі } (-2\pi; 0) \text{ за синусами.}$$

$$10. \text{ а) } f(x) = 1 - 4x, \quad x \in (-1; 1), \quad T = 2;$$

$$\text{б) } f(x) = \begin{cases} \pi + 2x, & x \in \left(0; \frac{2\pi}{3}\right] \\ -4, & x \in \left(\frac{2\pi}{3}; \pi\right) \end{cases} \text{ на інтервалі } (0; \pi) \text{ за косинусами.}$$

Завдання 13. За допомогою перетворення Лапласа розв'язати задачу Коші.

$$1. \text{ а) } \ddot{x} + x = 2 \cos t, \quad x(0) = -1, \quad \dot{x}(0) = 1;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - 4x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 2, & t > 3, \\ 1, & 1 < t < 3, \\ 0, & t < 1; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - 4x + 3y = \sin t, \\ \dot{y} - 2x + y = -2 \cos t, \end{cases} \quad x(0) = 1, \quad y(0) = 1.$$

$$2. \text{ a) } \ddot{x} + 4x = 2 \sin 2t, \quad x(0) = -1, \quad \dot{x}(0) = 0;$$

$$\text{б) } \ddot{x} + x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 2, \quad f(t) = \begin{cases} 0, & t < 1, \\ -2, & 1 < t < 2, \\ 1, & t > 2; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - x - 2y = t, \\ \dot{y} - 2x - y = t, \end{cases} \quad x(0) = 2, \quad y(0) = 4.$$

$$3. \text{ a) } \ddot{x} + 2\dot{x} + 10x = \sin 3t + 6 \cos 3t, \quad x(0) = 1, \quad \dot{x}(0) = 1;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - 2\dot{x} + x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 1, & t > 4, \\ 2, & 2 < t < 4, \\ 0, & t < 2; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} + 5x - 2y = e^t, \\ \dot{y} - x + 6y = 0, \end{cases} \quad x(0) = 1, \quad y(0) = 0.$$

$$4. \text{ a) } \ddot{x} + 2\dot{x} + x = te^t, \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 1;$$

$$\text{б) } \ddot{x} + 49x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 3, & t > 4, \\ -1, & 2 < t < 4, \\ 0, & t < 2; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - 3x - 4y = 6e^{2t}, \\ \dot{y} + 2x + 3y = 3e^{2t}, \end{cases} \quad x(0) = 2, \quad y(0) = 0.$$

$$5. \text{ a) } \ddot{x} + x = 6e^{-t}, \quad x(0) = 3, \quad \dot{x}(0) = 1;$$

$$\text{б) } \ddot{x} + \dot{x} - 2x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 1, \quad f(t) = \begin{cases} 3, & 0 < t < 4, \\ 2, & 4 < t < 7, \\ 0, & t < 0, \quad t > 7; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - x - 4y = 0, \\ \dot{y} - 2x + y = 9, \end{cases} \quad x(0) = 1, \quad y(0) = 0.$$

$$6. \text{ a) } \ddot{x} - 2\dot{x} - 3x = 2t, \quad x(0) = 1, \quad \dot{x}(0) = 1;$$

$$\text{б) } \ddot{x} + x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 2, & 0 < t < 1, \\ 4, & t > 1, \\ 0, & t < 0; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - 2x - 5y = 0, \\ \dot{y} - x + 2y = 2, \end{cases} \quad x(0) = 1, \quad y(0) = 1.$$

$$7. \text{ a) } \ddot{x} - 9x = \sin t - \cos t, \quad x(0) = -3, \quad \dot{x}(0) = 2;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - 2\dot{x} - 3x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 1, & t > 4, \\ 2, & 2 < t < 4, \\ 0, & t < 2; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} + 2x - 5y = 1, \\ \dot{y} - x - 2y = 1, \end{cases} \quad x(0) = 0, \quad y(0) = 2.$$

$$8. \text{ a) } \ddot{x} + \dot{x} + x = t^2 + 2t, \quad x(0) = 4, \quad \dot{x}(0) = -2;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - 4x = f(t), \quad x(0) = 1, \quad \dot{x}(0) = 1, \quad f(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < 1, \\ -1, & 1 < t < 2, \\ 0, & t < 0, \quad t > 2; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - 3x - y = 0, \\ \dot{y} + 5x + 3y = 2, \end{cases} \quad x(0) = 2, \quad y(0) = 0.$$

$$9. \text{ a) } \ddot{x} - 3\dot{x} + 2x = 2e^t \cos \frac{t}{2}, \quad x(0) = 1, \quad \dot{x}(0) = 0;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - 2\dot{x} + x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} 2, & t > 3, \\ -1, & 1 < t < 3, \\ 0, & t < 1; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - x - y = 0, \\ \dot{y} - 4x - y = 1, \end{cases} \quad x(0) = 1, \quad y(0) = 0.$$

$$10. \text{ a) } \ddot{x} + 4x = 4e^{2t} + 4t^2, \quad x(0) = 1, \quad \dot{x}(0) = 2;$$

$$\text{б) } \ddot{x} - x = f(t), \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad f(t) = \begin{cases} -1, & t > 2, \\ 2, & 0 < t < 2, \\ 0, & t < 0; \end{cases}$$

$$\text{B)} \begin{cases} \dot{x} - x + y = 0, \\ \dot{y} - x - y = e^t, \end{cases} \quad x(0) = 3, \quad y(0) = 2.$$

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ, ЇЇ ПОДАННЯ І ПЕРЕВІРКА

Номер варіанта контрольної роботи, що виконується, повинен співпадати з ДВОМА останніми цифрами номера залікової книжки. Номери задач з кожного завдання вибираються з таблиці, наведеної нижче. Виконана контрольна робота переписується в окремий зошит. Розв'язки задач наводяться зі збереженням номерів задач, у порядку зростання цих номерів. Перед розв'язком кожної задачі треба повністю вписати її умову. На обкладинку зошита слід наклеїти заповнений реєстраційний бланк (вказати номер контрольної роботи, назву дисципліни, групу і факультет, прізвище, ім'я та по батькові, номер залікової книжки, домашню адресу). Оформлена належним чином робота реєструється у деканаті. Її необхідно подати на кафедру вищої математики завчасно, але не пізніше як за 10 днів до початку екзаменаційної сесії. Після перевірки викладач робить висновок про те, вірно чи невірно виконана робота, з відповідним надписом на обкладинці. Якщо робота виконана не повністю або невірно, то викладач вказує номери відсутніх або невірно розв'язаних задач і, якщо необхідно, робить свої зауваження у вигляді короткої рецензії. Роботи з не усіма задачами, або ж з такими, що повністю або частково не відповідають даному варіанту, вважаються виконаними невірно. Студент повинен виправити усі помилки у тому ж зошиті після рецензії викладача у розділі "Робота над помилками" і повернути роботу у найкоротший термін. Виправлення у перевірненій роботі поверх позначок викладача не допускаються. Студент може бути допущений до захисту контрольної роботи, порядок якого визначається викладачем, тільки після повторної перевірки виправлених помилок. На екзамен (залік) допускаються тільки студенти з захищеною роботою.

Склад варіантів контрольної роботи

Номер варіанта	Завд. 1	Завд. 2	Завд. 3	Завд. 4	Завд. 5	Завд. 6	Завд. 7	Завд. 8	Завд. 9	Завд. 10	Завд. 11	Завд. 12	Завд. 13
00	6	6	4	5	6	1	6	4	5	6	3	2	2
01	4	7	3	9	10	6	4	2	9	10	4	8	6
02	3	4	9	6	5	7	3	9	6	5	5	9	7
03	9	3	8	1	1	4	9	8	1	1	6	7	4
04	1	10	10	3	3	5	1	10	3	3	7	1	3

05	10	2	2	2	9	3	10	3	2	9	10	5	10
06	2	8	1	8	2	10	2	1	8	2	8	4	2
07	8	9	7	4	8	2	8	7	4	8	9	3	8
08	7	5	6	7	7	8	7	6	7	7	2	10	9
09	5	1	5	10	4	9	5	5	10	4	1	6	5
10	4	10	7	3	3	4	3	7	3	3	1	10	1
11	1	2	1	7	5	6	2	1	7	5	2	8	10
12	9	9	5	1	1	5	9	5	1	1	9	7	2
13	7	7	3	4	7	9	7	3	4	7	5	4	9
14	5	6	2	10	10	8	6	2	10	10	6	6	7
15	8	4	10	8	6	7	4	10	8	6	7	9	6
16	6	8	4	5	8	10	8	4	5	8	3	1	4
17	10	3	6	2	4	2	10	6	2	4	8	5	8
18	3	5	9	9	9	1	5	9	9	9	4	3	3
19	2	1	8	6	2	3	1	8	6	2	10	2	5
20	5	6	6	8	5	10	6	6	10	5	8	6	1
21	2	9	9	2	3	7	9	9	2	3	6	7	6
22	9	2	2	9	4	6	2	2	9	4	9	10	9
23	4	7	7	4	7	4	7	7	4	7	7	1	2
24	1	10	10	1	9	1	10	10	1	9	10	9	7
25	6	5	5	7	6	2	5	5	7	8	5	8	10
26	7	4	4	6	2	3	4	4	6	2	4	2	5
27	8	3	3	5	8	5	3	3	5	6	3	3	4
28	3	8	8	3	1	8	8	8	3	1	2	5	3
29	10	1	1	10	10	9	1	1	8	10	1	4	8
30	5	6	6	1	5	4	6	6	1	5	4	7	1
31	4	5	5	2	10	6	5	5	2	10	5	1	6
32	7	10	8	6	6	5	10	8	6	6	1	10	5
33	3	4	4	3	1	10	4	4	3	1	10	6	10
34	9	9	10	9	3	7	9	10	9	3	3	9	4
35	6	7	7	5	8	3	7	7	5	8	2	8	9
36	2	1	2	8	7	2	1	2	8	7	6	2	7
37	10	8	9	10	4	8	8	9	10	4	7	5	1
38	1	2	3	4	2	9	2	3	4	2	8	4	8
39	8	3	1	7	9	1	3	1	7	9	9	3	2
40	6	4	7	4	7	1	4	7	4	7	4	9	3
41	5	10	5	3	10	9	10	5	3	10	2	6	4
42	2	3	8	7	6	4	3	8	7	8	7	1	10
43	10	7	4	2	1	8	7	4	2	1	10	3	3
44	1	5	9	8	5	3	5	9	8	5	6	2	7
45	4	2	3	5	2	5	2	3	5	2	5	4	5
46	3	6	6	10	4	2	6	6	10	4	9	10	2
47	8	8	2	6	8	7	8	2	6	6	3	5	6
48	9	1	10	9	3	6	1	10	9	3	8	7	8
49	7	9	1	1	9	10	9	1	1	9	1	8	1
50	10	2	1	7	8	3	2	1	7	8	5	6	9
51	9	8	2	8	1	4	8	2	8	1	9	4	2
52	8	9	3	6	6	5	9	3	6	6	6	3	8
53	7	7	5	5	5	6	7	5	5	5	1	9	9
54	1	1	10	9	4	7	1	10	9	4	3	1	7

55	5	5	6	3	9	10	5	6	3	9	2	10	1
56	4	4	7	2	3	8	4	7	2	3	8	2	5
57	3	3	8	1	10	9	3	8	1	10	4	8	4
58	2	10	9	10	7	2	10	9	10	7	7	7	3
59	6	6	4	4	2	1	6	4	4	2	10	5	10
60	9	10	1	5	8	1	10	1	5	8	3	3	6
61	3	8	4	7	7	2	8	4	7	7	7	2	10
62	5	7	7	3	10	9	7	7	3	10	1	9	8
63	6	4	2	9	4	5	4	2	9	4	4	7	7
64	8	6	5	1	3	6	6	5	1	3	10	6	4
65	10	9	9	8	2	7	9	6	8	2	8	4	6
66	7	1	3	6	6	3	1	3	6	6	5	8	9
67	4	5	6	2	1	8	5	9	2	1	2	10	1
68	1	3	10	4	5	4	3	10	4	5	9	5	5
69	2	2	8	10	9	10	2	8	10	9	6	1	3
70	10	6	7	2	6	8	6	7	2	6	8	6	2
71	6	7	6	9	1	6	7	6	9	1	2	9	6
72	7	10	2	6	7	9	10	2	6	7	9	2	7
73	1	1	9	5	5	7	1	9	5	5	4	7	10
74	9	9	3	4	8	10	9	3	4	8	1	10	1
75	8	8	4	3	10	5	8	4	3	10	7	5	9
76	2	2	10	8	2	4	2	10	8	2	6	4	8
77	3	3	8	10	4	3	3	8	10	4	5	3	2
78	5	5	5	1	3	2	5	5	1	3	3	8	3
79	4	4	1	7	9	1	4	1	7	9	10	1	5
80	8	7	1	6	6	4	7	1	6	6	1	6	4
81	10	1	3	7	8	5	1	3	7	8	2	5	7
82	6	10	4	3	3	1	10	4	3	3	6	10	1
83	9	6	2	8	7	10	6	2	8	7	3	4	10
84	5	9	5	9	10	3	9	5	9	10	9	9	6
85	7	8	7	10	9	2	8	7	10	9	5	7	9
86	1	2	10	5	5	6	2	10	5	5	8	1	8
87	3	5	8	1	1	7	3	8	1	1	10	8	2
88	4	4	6	2	4	8	5	6	2	4	4	2	5
89	2	3	9	4	2	9	4	9	4	2	7	3	4
90	8	9	8	8	4	4	9	8	8	4	4	4	3
91	4	6	1	4	2	2	6	1	4	2	3	10	9
92	10	1	9	6	7	7	1	9	6	7	7	3	6
93	3	3	7	1	10	10	3	7	1	10	2	7	1
94	7	2	3	5	6	6	2	3	5	6	8	5	3
95	5	4	2	7	5	5	4	2	7	5	5	2	2
96	6	10	6	10	9	9	10	6	10	9	10	6	4
97	1	5	10	2	3	3	5	10	2	3	6	8	10
98	2	7	5	3	8	8	7	5	3	8	9	1	5
99	9	8	4	9	1	1	8	4	9	1	1	9	7

ДОДАТКИ

Додаток 1

ЗОБРАЖЕННЯ ОСНОВНИХ ОРИГІНАЛІВ

ОРИГІНАЛ	ЗОБРАЖЕННЯ
<i>Одинична функція Хевісайда</i> $\eta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$	$\frac{1}{p}$
e^t	$\frac{1}{p-1}$
$\sin t$	$\frac{1}{p^2+1}$
$\cos t$	$\frac{p}{p^2+1}$
sht	$\frac{1}{p^2-1}$
cht	$\frac{p}{p^2-1}$

ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЛАПЛАСА

ОРИГІНАЛ	ЗОБРАЖЕННЯ
<i>Лінійність</i>	
$\sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(t)$	$\sum_{i=1}^n \alpha_i F_i(p)$
<i>Подібність</i>	
$f(\alpha t) \quad (\forall \alpha > 0)$	$\frac{1}{\alpha} F\left(\frac{p}{\alpha}\right) \quad (\forall \alpha > 0)$
Зокрема, e^{at}	$\frac{1}{p-a}$
$\sin(at)$	$\frac{a}{p^2 + a^2}$
$\cos(at)$	$\frac{p}{p^2 + a^2}$
$sh(at)$	$\frac{a}{p^2 - a^2}$
$ch(at)$	$\frac{p}{p^2 - a^2}$
<i>Зміщення</i>	
$e^{-\alpha t} f(t) \quad (\forall \alpha)$	$F(p + \alpha) \quad (\forall \alpha)$
Зокрема, $e^{-bt} \sin t$	$\frac{1}{(p+b)^2 + 1}$
$e^{-bt} \cos t$	$\frac{p+b}{(p+b)^2 + 1}$
<i>Запізнювання</i>	

$f(t - t_0) \cdot \eta(t - t_0) \quad (\forall t_0 > 0)$	$e^{-t_0 p} F(p) \quad (\forall t_0 > 0)$
<p>Зокрема,</p> $\eta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ 1, & t \geq t_0 \end{cases}$ <p>(узагальнена одинична функція)</p>	$e^{-t_0 p} \cdot \frac{1}{p}$
<i>Диференціювання оригіналу</i>	
$f(t)$	$F(p)$
$f'(t)$	$pF(p) - f(0)$
$f''(t)$	$p^2 F(p) - p f(0) - f'(0)$
$f'''(t)$	$p^3 F(p) - p^2 f(0) - p f'(0) - f''(0)$
.....
$f^{(n)}(t)$	$p^n F(p) - \sum_{k=1}^n p^{n-k} f^{(k-1)}(0),$ $f^{(i)}(0) = \lim_{t \rightarrow 0+0} f^{(i)}(t) \quad (i = 0, 1, \dots, n-1)$
<i>Інтегрування оригіналу</i>	
$\int_0^t f(\tau) d\tau$	$\frac{F(p)}{p}$
<i>Диференціювання зображення</i>	
$f(t)$	$F(p)$
$t \cdot f(t)$	$-F'(p)$
$t^2 f(t)$	$F''(p)$
$t^3 f(t)$	$-F'''(p)$
.....
$t^n f(t)$	$(-1)^n F^{(n)}(p)$
Зокрема, t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$

<i>Інтегрування зображення</i>	
$\frac{f(t)}{t}$	$\int_p^{\infty} F(q) dq$
<i>Зокрема,</i> $\frac{\sin t}{t}$	$\frac{\pi}{2} - \text{arctg } p$
<i>Згортка</i>	
$f(t) * g(t) = g(t) * f(t) = \int_0^t f(\tau) g(t - \tau) d\tau = \int_0^t g(\tau) f(t - \tau) d\tau$	
<i>Теорема Бореля</i>	
$f(t) * g(t)$	$F(p) \cdot G(p)$
<i>Інтеграл Дюамеля</i>	
$\int_0^t f(\tau) \cdot g'(t - \tau) d\tau + f(t) \cdot g(0)$ $\int_0^t g'(\tau) \cdot f(t - \tau) d\tau + f(t) \cdot g(0)$ $\int_0^t g(\tau) \cdot f'(t - \tau) d\tau + f(0) \cdot g(t)$ $\int_0^t f'(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau + f(0) \cdot g(t)$	$p \cdot F(p) \cdot G(p)$

ОРИГІНАЛИ ДЕЯКИХ ДРОБОВО-РАЦІОНАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ

ЗОБРАЖЕННЯ	ОРИГІНАЛ
$\frac{1}{p(p+a)}$	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$
$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$
$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{a-b}(ae^{-at} - be^{-bt})$
$\frac{1}{(p+a)^2}$	te^{-at}
$\frac{p}{(p+a)^2}$	$(1-at)e^{-at}$
$\frac{1}{p^2(p+a)}$	$\frac{1}{a^2}(e^{-at} + at - 1)$
$\frac{1}{p(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{ab(a-b)}(a-b + be^{-at} - ae^{-bt})$
$\frac{1}{p(p+a)^2}$	$\frac{1}{a^2}[1 - e^{-at}(1+at)]$
$\frac{1}{(p+a)(p+b)^2}$	$\frac{1}{(b-a)^2}[e^{-at} - e^{-bt} - (b-a)te^{-bt}]$
$\frac{p}{(p+a)(p+b)^2}$	$\frac{1}{(b-a)^2}[-ae^{-at} + a + b(b-a)te^{-bt}]$
$\frac{p}{(p+a)^3}$	$te^{-at}\left(1 + \frac{a}{2}t\right)$
$\frac{p^2}{(p+a)^3}$	$e^{-at}\left(1 - 2at + \frac{a^2}{2}t^2\right)$
$\frac{1}{p[(p+b)^2 + a^2]}$	$\frac{1}{a^2 + b^2}\left[1 - e^{-bt}\left(\cos(at) + \frac{b}{a}\sin(at)\right)\right]$
$\frac{1}{p(p^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2}[1 - \cos(at)]$
$\frac{2a^2}{p(p^2 + 4a^2)}$	$\sin^2(at)$

$\frac{p^2 + 2a^2}{p(p^2 + 4a^2)}$	$\cos^2(at)$
$\frac{1}{(p+a)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{a^2+b^2} \left[e^{-at} + \frac{a}{b} \sin(bt) - \cos(bt) \right]$
$\frac{p}{(p+a)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{a^2+b^2} \left[-ae^{-at} + a \cos(bt) + b \sin(bt) \right]$
$\frac{p^2}{(p+a)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{a^2+b^2} \left[a^2 e^{-at} - ab \sin(bt) + b^2 \cos(bt) \right]$
$\frac{1}{(p+a)[(p+b)^2+c^2]}$	$\frac{1}{(b-a)^2+c^2} \left[e^{-at} - e^{-bt} \cos(ct) + \frac{a-b}{c} e^{-bt} \sin(ct) \right]$
$\frac{p}{(p+a)[(p+b)^2+c^2]}$	$\frac{1}{(b-a)^2+c^2} \left[-ae^{-at} + ae^{-bt} \cos(ct) - \frac{ab-b^2-c^2}{c} e^{-bt} \sin(ct) \right]$
$\frac{p^2}{(p+a)[(p+b)^2+c^2]}$	$\frac{1}{(b-a)^2+c^2} \left[a^2 e^{-at} + [(a-b)^2+c^2-a^2] e^{-bt} \cdot \cos(ct) - \left\{ ac + b \left(c - \frac{(a-b)b}{c} \right) \right\} e^{-bt} \sin(ct) \right]$
$\frac{1}{p^3(p+a)}$	$\frac{1}{a^3} - \frac{1}{a^2}t + \frac{1}{2a}t^2 - \frac{1}{a^3}e^{-at}$
$\frac{1}{p^2(p+a)(p+b)}$	$-\frac{a+b}{a^2b^2} + \frac{1}{ab}t + \frac{1}{a^2(b-a)}e^{-at} + \frac{1}{b^2(a-b)}e^{-bt}$
$\frac{1}{p^2(p+a)^2}$	$\frac{1}{a^2}t \left(1 + e^{-at} \right) + \frac{2}{a^3} \left(e^{-at} - 1 \right)$
$\frac{1}{(p+a)^2(p+b)^2}$	$\frac{1}{(a-b)^2} \left[e^{-at} \left(t + \frac{2}{a-b} \right) + e^{-bt} \left(t - \frac{2}{a-b} \right) \right]$
$\frac{1}{(p^2+a^2)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{b^2-a^2} \left[\frac{1}{a} \sin(at) - \frac{1}{b} \sin(bt) \right]$
$\frac{p}{(p^2+a^2)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{b^2-a^2} \left[\cos(at) - \cos(bt) \right]$
$\frac{p^2}{(p^2+a^2)(p^2+b^2)}$	$\frac{1}{b^2-a^2} \left[-a \sin(at) + b \sin(bt) \right]$

$\frac{p^3}{(p^2 + a^2)(p^2 + b^2)}$	$\frac{1}{b^2 - a^2} \left[-a^2 \cos(at) + b^2 \cos(bt) \right]$
$\frac{1}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2a^2} \left[\frac{1}{a} \sin(at) - t \cos(at) \right]$
$\frac{p}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2a} t \sin(at)$
$\frac{p^2}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2a} \left[\sin(at) + at \cos(at) \right]$
$\frac{p^2 - a^2}{(p^2 + a^2)^2}$	$t \cdot \cos(at)$
$\frac{2ap}{(p^2 - a^2)^2}$	$t \cdot sh(at)$
$\frac{p^2 + a^2}{(p^2 - a^2)^2}$	$t \cdot ch(at)$
$\frac{p^3}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2} \left[2 \cos(at) - at \sin(at) \right]$
$\frac{1}{[(p+b)^2 + a^2]^2}$	$\frac{1}{2a^2} e^{-bt} \left[\frac{1}{a} \sin(at) - t \cos(at) \right]$
$\frac{1}{p^2(p^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2} \left[t - \frac{1}{a} \sin(at) \right]$
$\frac{a(p^2 + a^2 - b^2)}{[p^2 + (a-b)^2][p^2 + (a+b)^2]}$	$\sin(at) \cdot \cos(bt)$