

ЗАДАНИЕ ПО КУРСУ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ II»

Автор: Шишкин П.Е.

От: 15 апреля 2021 г.

Содержание

1 От авторов	2
1.1 Шрифт для личных сообщений	2
1.2 Благодарности	2
1.3 Заходите в гости	2
2 I. Первые интегралы и их использование для решений автономных систем	2
2.1 С. §14: 12	2
2.2 Ф.: 1149	3
2.3 Т1	4
2.4 С. §16: 5	5
2.5 С. §16: 26	6
3 II. Линейные однородные уравнения в частных производных первого порядка	6
3.1 С. §17: 5	6
3.2 С. §17: 16	7
3.3 С. §17: 22	8
3.4 С. §17: 79	9
3.5 С. §17: 83	10
3.6 Т2	10
4 III. Вариационное исчисление	11
4.1 С. §19: 21	11
4.2 С. §19: 45	11
4.3 С. §19: 72	11
4.4 С. §19: 105	11
4.5 Т3	11
4.6 С. §20.1: 9	11
4.7 С. §20:	11
4.8 Т4	11
4.9 С. §20.2: 5	11
4.10 С. §20.3: 2	11
4.11 С. §21: 1	11
4.12 Т5*	11

1 От авторов

1.1 Шрифт для личных сообщений

Меня попросили писать текст не имеющий отношения к решению как-то выделенно, поэтому отныне текст, который я пишу просто от души и сердца, будет написан курсивным шрифтом цвета лягушки в обмороке (я серьёзно, такой цвет есть)

1.2 Благодарности

Я благодарен *список людей* за *причины* *FIXME*

1.3 Заходите в гости

Заходите в гости, всегда всем рад :)

2 I. Первые интегралы и их использование для решений автономных систем

2.1 С. §14: 12

Исследовать при всех значениях вещественного параметра a поведение фазовых траекторий на всей фазовой плоскости для системы:

$$\begin{cases} \dot{x} = y + ax(x^2 + y^2 - 2) \\ \dot{y} = -x + ay(x^2 + y^2 - 2) \end{cases} \quad (1)$$

Уравнение выглядит, как что-то в полярных координатах. Чем же, перейдём к ним

$$\begin{aligned} x &= r \sin(\varphi) & \dot{x} &= r \cos(\varphi)\dot{\varphi} + \dot{r} \sin(\varphi) \\ y &= r \cos(\varphi) & \dot{y} &= -r \sin(\varphi)\dot{\varphi} + \dot{r} \cos(\varphi) \end{aligned}$$

Откуда:

$$\begin{cases} r \cos(\varphi)\dot{\varphi} + \dot{r} \sin(\varphi) = r \cos(\varphi) + ar \sin(\varphi)(r^2 - 2) \\ -r \sin(\varphi)\dot{\varphi} + \dot{r} \cos(\varphi) = -r \sin(\varphi) + ar \cos(\varphi)(r^2 - 2) \end{cases}$$

Откуда можно получить

$$\begin{cases} \dot{r} = ra(r^2 - 2) \\ \dot{\varphi} = 1 \end{cases}$$

Здесь уже очевидны 3 случая: 1) $a > 0$, 2) $a < 0$ 3) $a = 0$. 1) неустойчивый предельный цикл радиуса $\sqrt{2}$ 2) устойчивый предельный цикл радиуса $\sqrt{2}$ 3) центр. Разница при различных знакопределённых параметрах будет в скорости "навивания" на предельный цикл, но характер движения будет схожий.

Кстати, $\dot{\varphi} = 1$ - это первый интеграл. В целом мы сказали при каких параметрах, что но можно это всё безобразие построить 1. Чтобы было максимально красиво, построим фазовую диаграмму для r график в декартовых координатах и зависимость угла от радиуса. Кстати такая фигня с производной фи получилась из-за неклассической замены икса с синусом. Т.е. немного континтутивно что $\varphi = 1$ это цикл по часовой стрелке, но и замена $x = \sin(\varphi)$ это что-то безумное (я просто хотел кушать а не думать)

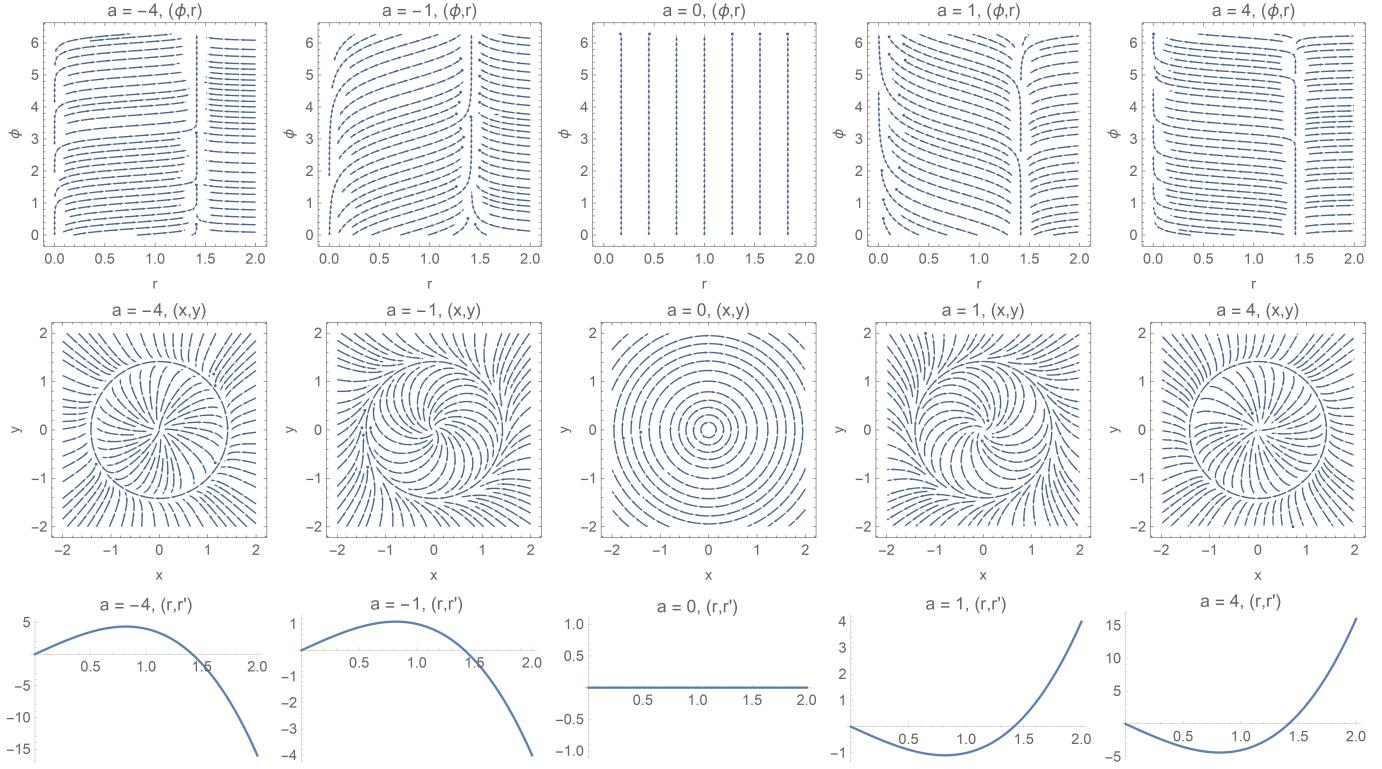


Рис. 1: Фазовые диаграммы 14.12 в различных координатах для различных параметров

2.2 $\Phi.: 1149$

Решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = y - x \\ \dot{y} = x + y + z \\ \dot{z} = x - y \end{cases} \quad (2)$$

Довольно очевидно, что выделить 2 каких-то уравнения без третьей переменной тут не выйдет (*ну или я слишком слаб и не могу этого сделать*) поэтому воспользуемся правилом пропорции (чёрной магией):

$$A/B = C/D = E/F = k; \forall \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}, \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 \neq 0 \rightarrow \frac{\alpha A + \beta C + \gamma E}{\alpha B + \beta D + \gamma F} = k$$

Тогда можно записать учитывая $k = dt$:

$$\frac{\alpha dx + \beta dy + \gamma dz}{\alpha(y - x) + \beta(x + y + z) + \gamma(x - y)} = dt$$

Возьмём $\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 1$ тогда знаменатель обнулится, а значит и числитель должен быть ноль (*на самом деле можно было бы сформулировать этот шаг гораздо проще, просто вычитая первое и третье уравнения друг из друга, но 1) правило пропорции весьма полезная штуковина в этих задачах, так что чего бы не сформулировать его, 2) обожаю делить на 0 эхэхэхэхэ*

Итак, мы получаем что: $dx + dz = 0$ а значит мы нашли первый интеграл системы 2: $C_1 = x + z$. Подставим его

во второе и первое уравнения 2 и получим

$$\begin{aligned}\frac{dy}{y+C_1} &= \frac{dx}{y-x} \\ y'(y-x) &= (y+C_1) \\ //y &= x+t// \\ tt' &= x+C_1 \\ t^2 &= x^2 + 2C_1x + C_2 \\ C_2 &= y^2 - 2xy + 2(x+z)x\end{aligned}$$

Найдены 2 ПИ. Осталось проверить их на независимость.

$$\text{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \text{rg} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -2y+4x+2z & 2y-2x & 2x \end{vmatrix} = 2$$

тут хочется сказать 2 вещи: 1) интегралов целая куча зависимых, и то что мой C_2 не совпадает с ответом в задачнике, это ок, потому что они друг через друга выражаются 2) так-то очевидно что они независимы, всё-таки второй зависит от y а первый - нет; но на письмаках требуют считать ранг, потому проверяю так

Ответ: $C_2 = y^2 - 2xy + 2(x+z)x$, $C_1 = \frac{11(x+y)}{09.2002}$

2.3 T1

Найти первые интегралы уравнений. Используя их, исследовать поведение траекторий на фазовой плоскости.

a) $\ddot{x} + \sin(x) = 0$

Сделаем замену $\dot{x} = y$ тогда:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -\sin(x) \end{cases}$$

по правилу пропорции и обнуляя знаменатель:

$$\begin{aligned}\frac{\alpha dx + \beta dy}{\alpha y - \beta \sin(x)} &= dt \\ //\beta = y, \alpha = \sin(x)// \\ -\cos(x) + \frac{y^2}{2} &= C_1\end{aligned}$$

Второго первого интеграла тут не будет, иначе бы задача математического маятника решалась слишком легко. Зато у нас есть интеграл энергии. Из него можно немного подумать и получить различные ситуации: $C_1 = 0$, $C_1 > 0$, $C_1 < 0$. Подставив этот первый интеграл, можно сделать линеаризацию системы, получить что $(2\pi n, 0)$ - центры, $(\pi(2k-1), 0)$ - седла, и получить такое поведение: 2

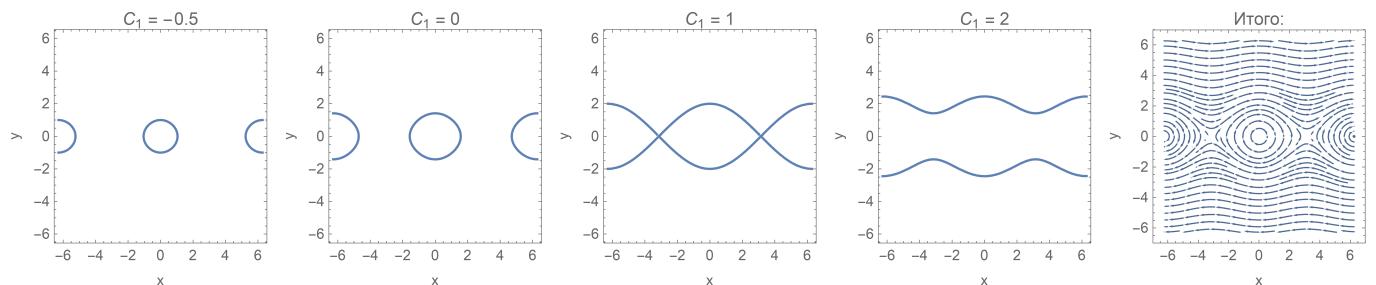


Рис. 2: T1(a)

6) $\ddot{x} - x + x^2 = 0$

Сделаем замену $\dot{x} = y$ тогда:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = x - x^2 \end{cases}$$

по правилу пропорции и обнуляя знаменатель:

$$\frac{\alpha dx + \beta dy}{\alpha y + \beta(x - x^2)} = dt$$

$$/\!\beta = y, \alpha = -(x - x^2) //$$

$$-3x^2 + 2x^3 + 3y^2 = C_1$$

Можно построить эту петельку: 3

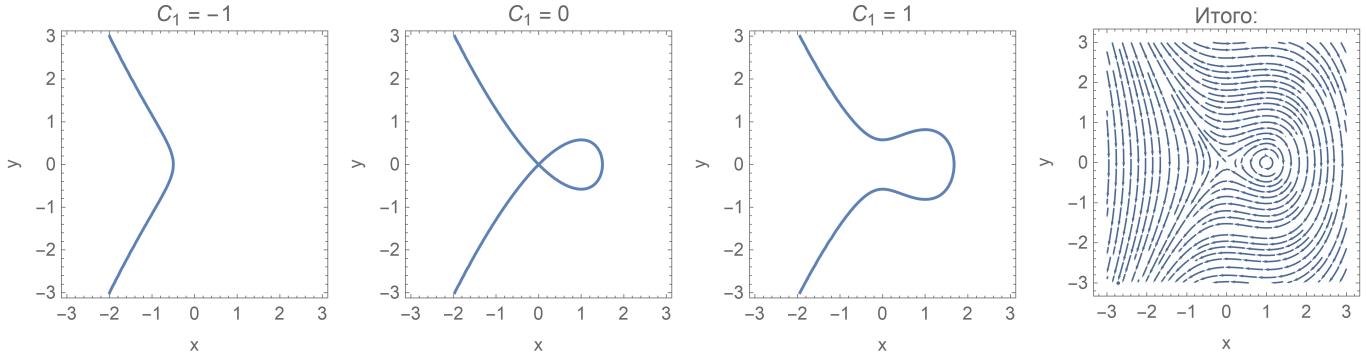


Рис. 3: Т1(б)

2.4 С. §16: 5

Найдя первый интеграл, решить систему в указанной области

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{x}{y}, \\ \dot{y} = \frac{y}{x}, (x > 0, y > 0). \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку $dx \frac{y}{x} + dy \frac{x}{y} = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{y^2} &= -\frac{dx}{x^2} \\ \frac{1}{y} &= -\frac{1}{x} + C_1 \\ y &= \frac{x}{C_1 x - 1} \end{aligned}$$

Подставим y в первое уравнение 3:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 1 - C_1 x \\ \frac{dx}{1 - C_1 x} &= dt \\ x &= \frac{C_2}{C_1} e^{-C_1 t} + \frac{1}{C_1} \end{aligned}$$

Подставим x в y и получаем ответ:

Ответ: $x = \frac{C_2}{C_1} e^{-C_1 t} + \frac{1}{C_1}$, $y = \frac{e^{C_1 t}}{C_1 C_2} + \frac{1}{C_1}$ ответ не сходится с ответом в учебнике в силу разных обозначений C_2 . Так-то ответ мой правильный (ответ учебника я в вольфраме не проверял)

2.5 C. §16: 26

Найдя два независимых первых интеграла системы, решить систему в указанной области.

$$\begin{cases} \dot{x} = x^2, \\ \dot{y} = 2x^3 - xy - z, \\ \dot{z} = xz - 2x^4, (x > 0) \end{cases} \quad (4)$$

Хмм, кажется что первое уравнение системы интегрируется. Ну раз так, проинтегрируем: $x = \frac{1}{C_1 - t}$. Далее смотрим на оставшиеся 2 уравнения. Возьмём то в котором кроме x не более 1 другой переменной. Т.е. третье. Подставив x можем получить:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{z}{C_1 - t} - 2 \frac{1}{(C_1 - t)^4} \\ //\tau &= C_1 - t, \dot{z} = -\frac{dz}{d\tau} = -z' // \\ z' + \frac{z}{\tau} &= 2 \frac{1}{\tau^4} \end{aligned}$$

//О, это же уравнение Эйлера, его мы умеем решать заменой $\tau = e^T$, $z'_\tau = z'_T e^{-T}$ //

$$z' + z = 2e^{-3T}$$

//находит общее, угадываем частное, благо тут оно очевидное и получаем ответ//

$$z(T) = C_2 e^{-T} - e^{-3T} = z(\tau) = \frac{C_2}{\tau} - \frac{1}{\tau^3} = z(t) = \frac{C_2}{C_1 - t} - \frac{1}{(C_1 - t)^3}$$

Теперь подставим $x(t)$ и $z(t)$ во второе уравнение системы 4:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \frac{3}{(C_1 - t)^3} - \frac{C_2}{(C_1 - t)} - \frac{y}{C_1 - t} \\ //C_1 - t &= e^T, \dot{y} = y'_T e^{-T} // \\ -y'_T e^{-T} &= 3e^{-3T} - C_2 e^{-T} - ye^{-T} \\ y'_T - y &= C_2 - 3e^{-2T} \\ y(T) &= C_3 e^T - C_2 + e^{-2T} = y(t) = C_3(C_1 - t) - C_2 + \frac{1}{(C_1 - t)^3} \end{aligned}$$

И чтобы посмотреть на этот ужас скопированно:

$$\text{Ответ: } x(t) = \frac{1}{C_1 - t},$$

$$y(t) = C_3(C_1 - t) - C_2 + \frac{1}{(C_1 - t)^3},$$

$$z(t) = \frac{C_2}{C_1 - t} - \frac{1}{(C_1 - t)^3}.$$

На самом деле надо ещё показать что первые интегралы C_1, C_2 независимы. Ну если очень хочется можно их выразить, явно посчитать ранг и т.д. Но я воспользуюсь следующим утверждением: поскольку система разрешима (мы смогли решить 2 уравнение) с использованием этих первых 2 интегралов, то они независимы. Пока эти первые интегралы больше используются, как оконстанты. И мало смысла смотреть на них как-то иначе. В следующей части задания это будет не совсем так.

3 II. Линейные однородные уравнения в частных производных первого порядка

3.1 C. §17: 5

Найти общее решение уравнения и решить задачу Коши с указанным начальным условием

$$x \frac{\partial u}{\partial x} + y \frac{\partial u}{\partial y} + z^2(x - 3y) \frac{\partial u}{\partial z} = 0, u = \frac{x^2}{y} \text{ при } 3yz = 1 \quad (5)$$

Найдём характеристическую систему уравнения 5.

$$\begin{cases} \dot{x} = x, & (1) \\ \dot{y} = y, & (2) \\ \dot{z} = z^2(x - 3y), & (3) \end{cases}$$

Для решения надо найти 2 независимых первых интеграла. В данной задаче можно просто составить 2 линейные комбинации:

$$\begin{aligned} (1) \cdot y - (2) \cdot x &= 0 & (1) \cdot z^2 - (2) \cdot 3z^2 - (3) &= 0 \\ y \cdot dx &= x \cdot dy & z^2 \cdot dx - 3z^2 \cdot dy - dz &= 0 \\ \frac{dx}{x} &= \frac{dy}{y} & dx - 3dy - \frac{dz}{z^2} &= 0 \\ \ln \frac{x}{y} &= C_1(x, y, z) & x - 3y + \frac{1}{z} &= C_2(x, y, z) \end{aligned}$$

Вообще должно быть очевидно, что C_1 и C_2 независимы, потому что C_2 зависит от z а C_1 - нет. Но давайте проверим ранг. *просто это-то тут очевидно, а если наткнуться на задачу где не очевидно, а матаппарат не будет отработан будет печально*

$$\operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{1}{x} & -\frac{1}{x} & 0 \\ 1 & -3 & -\frac{1}{z^2} \end{vmatrix} = 2$$

Значит решением 5 будет $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) = \frac{x}{y}$, $U_2(x, y, z) = x - 3y + \frac{1}{z}$. Здесь я выкинул логарифм, потому что если логарифм отношения первого интеграла, то и без логарифма первый интеграл. Вообще это надо было сделать раньше, но я сделал тут :)

Решим ЗК.

$$\begin{cases} u = \frac{x^2}{y} \\ 3yz = 1 \\ \frac{x}{y} = U_1 \\ x - 3y + \frac{1}{z} = U_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \frac{x^2}{y} \\ 3yz = 1 \\ \frac{x}{y} = U_1 \\ x = U_2 \end{cases}$$

$$u = U_1 U_2 = \frac{x}{y} \left(x - 3y + \frac{1}{z} \right)$$

Ответ:

Общее решение 5: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) = \frac{x}{y}$, $U_2(x, y, z) = x - 3y + \frac{1}{z}$.

Решение ЗК 5: $u = U_1 U_2 = \frac{x}{y} \left(x - 3y + \frac{1}{z} \right)$

3.2 C. §17: 16

Найти общее решение уравнения и решить задачу Коши с указанным начальным условием

$$(z - x + 3y) \frac{\partial u}{\partial x} + (z + x - 3y) \frac{\partial u}{\partial y} - 2z \frac{\partial u}{\partial z} = 0, u = \frac{4y}{z} \text{ при } x = 3y . \quad (6)$$

Найдём характеристическую систему уравнения 6.

$$\begin{cases} \dot{x} = z - x + 3y, & (1) \\ \dot{y} = z + x - 3y, & (2) \\ \dot{z} = -2z, & (3) \end{cases}$$

Тут линейная комбинация только одна (ну или я слаб) $(1) + (2) + (3) = 0 \Rightarrow dx + dy + dz = 0 \Rightarrow x + y + z = C_1$.
Подставим этот первый интеграл во вторые 2 уравнения:

$$\begin{cases} \dot{y} = C_1 - 4y \\ \dot{z} = -2z \end{cases}$$

//перемножая крест накрест получим//

$$\begin{aligned} -2z\dot{y} &= \dot{z}(C_1 - 4y) \\ \frac{dz}{2z} &= \frac{dy}{C_1 - 4y} \\ C_2 &= \frac{z^2}{C_1 - 4y} = \frac{z^2}{x + z - 3y} \end{aligned}$$

Проверим независимость:

$$\text{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \dots = 2$$

Осталось только решить ЗК.

$$\begin{cases} u = \frac{4y}{z} \\ x = 3y \\ x + y + z = U_1 \\ \frac{z^2}{x+z-3y} = U_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \frac{4y}{z} \\ x = 3y \\ 4y + z = U_1 \\ z = U_2 \end{cases}$$

$$u = U_1/U_2 - 1 = \frac{x}{y}(x - 3y + \frac{1}{z}) = \frac{(x + y + z)(x - 3y + z)}{z^2} - 1$$

Ответ:

Общее решение 6: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) = x + y + z, U_2(x, y, z) = \frac{z^2}{x+z-3y}$.

Решение ЗК 6: $u = u = U_1/U_2 - 1 = \frac{x}{y}(x - 3y + \frac{1}{z}) = \frac{(x+y+z)(x-3y+z)}{z^2} - 1$

3.3 С. §17: 22

Найти общее решение уравнения и решить задачу Коши с указанным начальным условием

$$(2x^2z^2 + x) \frac{\partial u}{\partial x} - (4xyz^2 - y) \frac{\partial u}{\partial y} - (4xz^3 - z) \frac{\partial u}{\partial z} = 0, u = yz^2 \text{ при } x = z \quad (7)$$

найдём характеристическую систему уравнения ??.

$$\begin{cases} \dot{x} = (2x^2z^2 + x) \\ \dot{y} = (4xyz^2 - y) \\ \dot{z} = (4xz^3 - z) \end{cases}$$

Найдём первые интегралы:

Проверим независимость:

$$\operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \dots = 2$$

Осталось только решить ЗК.

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$u =$$

Ответ:

Общее решение ??: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) =$, $U_2(x, y, z) =$.

Решение ЗК ??: $u =$

3.4 С. §17: 79

Найти общее решение уравнения и решить задачу Коши с указанным начальным условием

$$2xy \frac{\partial u}{\partial x} + (1 - y^2 - 2xz) \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{y}{x} \frac{\partial u}{\partial z} = 0, u = \frac{1}{2} - y^2 \text{ при } y^2 + xz = 1 \quad (8)$$

найдём характеристическую систему уравнения ??.

$$\begin{cases} \dot{x} = \\ \dot{y} = \\ \dot{z} = \end{cases}$$

Найдём первые интегралы:

Проверим независимость:

$$\operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \dots = 2$$

Осталось только решить ЗК.

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$u =$$

Ответ:

Общее решение ??: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) =$, $U_2(x, y, z) =$.

Решение ЗК ??: $u =$

3.5 C. §17: 83

Найти общее решение уравнения и решить задачу Коши с указанным начальным условием

$$2xy \frac{\partial u}{\partial x} + (2x - y^2) \frac{\partial u}{\partial y} + y^3 z \frac{\partial u}{\partial z} = 0, u = x^2 z^2 \text{ при } y^2 = 2x \quad (9)$$

найдём характеристическую систему уравнения ??.

$$\begin{cases} \dot{x} = \\ \dot{y} = \\ \dot{z} = \end{cases}$$

Найдём первые интегралы:

Проверим независимость:

$$\operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \dots = 2$$

Осталось только решить ЗК.

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$u =$$

Ответ:

Общее решение ??: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) =$, $U_2(x, y, z) =$.

Решение ЗК ??: $u =$

3.6 T2

В области $x > 0, y > 0, z > 0$ найти все решения уравнения

$$(x^2 + y^2) \frac{\partial u}{\partial x} + 2xy \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{x^3 - xy^2}{z} \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

и решить задачу Коши $u = z^2$ при $y^2 - x^2 = 1$

найдём характеристическую систему уравнения ??.

$$\begin{cases} \dot{x} = \\ \dot{y} = \\ \dot{z} = \end{cases}$$

Найдём первые интегралы:

Проверим независимость:

$$\operatorname{rg} \begin{vmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial x} & \frac{\partial C_1}{\partial y} & \frac{\partial C_1}{\partial z} \\ \frac{\partial C_2}{\partial x} & \frac{\partial C_2}{\partial y} & \frac{\partial C_2}{\partial z} \end{vmatrix} = \dots = 2$$

Осталось только решить ЗК.

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$\begin{cases} u = \\ U_1 = \\ U_2 = \end{cases}$$

$$u =$$

Ответ:

Общее решение ??: $F[U_1(x, y, z), U_2(x, y, z)]$ где F - любая непрерывно дифференцируемая функция, $U_1(x, y, z) =$, $U_2(x, y, z) =$.

Решение ЗК ??: $u =$

4 III. Вариационное исчисление

4.1 C. §19: 21

4.2 C. §19: 45

4.3 C. §19: 72

4.4 C. §19: 105

4.5 T3

4.6 C. §20.1: 9

4.7 C. §20:

4.8 T4

4.9 C. §20.2: 5

4.10 C. §20.3: 2

4.11 C. §21: 1

4.12 T5*